

Abschnitt IV

Geotektonische Hypothesen

von Professor Dr. B. Gutenberg, Frankfurt a. M.

Kapitel 19

Grundlagen

§ 245. Die Problemstellung. Schon frühzeitig tauchte die Frage auf, wie sich die Erde im Laufe der Zeiten entwickelt hat, wie sie in früheren Epochen ausgesehen hat, insbesondere, ob immer die Meere und Ozeane etwa die gleiche Lage besaßen („Permanenz der Kontinente und Ozeane“), wie und warum sich Gebirge bildeten, welche Bewegungsvorgänge stattfanden und warum sie stattfanden.

Alle diese Vorgänge bezeichnet man als „Geotektonische Vorgänge“, die Hypothesen, die sich mit ihnen befassen, als „Geotektonische Hypothesen“. *Geotektonische Vorgänge entstehen durch Wirkungen von Kräften in der Erde, insbesondere in der Erdkruste; geotektonische Hypothesen sind die Versuche, den derzeitigen Zustand der Erde, insbesondere der Erdoberfläche als Folge der Wirkung gewisser Kräfte auf einen irgendwie angenommenen Zustand der Erde zu einem früheren Zeitpunkt abzuleiten unter Berücksichtigung der bekannten Zwischenzustände.* In den geotektonischen Hypothesen stecken somit mehrere Unbekannte, die durch Beobachtungen oder Hilfhypothesen gefunden werden müssen: der Zustand der Erde zu einer Reihe von Zeitpunkten, die wirkenden Kräfte und die Wirkungsweise dieser Kräfte. Es ist also kein Wunder, wenn die Zahl der geotektonischen Hypothesen möglicherweise größer ist als die Zahl der Hypothesen auf jedem anderen Gebiet. Ein Überblick über die wichtigeren Ansichten, die gegen sie erhobenen Einwände und ihre Vorzüge rührt von F. NÖLKE¹⁾ her. Im folgenden soll der Versuch gemacht werden, die erwähnten Unbekannten festzustellen, die wichtigsten zu erwartenden geotektonischen Vorgänge abzuleiten und die Ergebnisse mit den bekannten geotektonischen Hypothesen zu vergleichen.

Wir müssen uns also zunächst mit den erwähnten Unbekannten befassen. Hierbei ergibt sich eine Schwierigkeit dadurch, daß die Ansichten über diese ziemlich weit auseinandergehen, so daß fast stets ein subjektives Moment in die Darstellung kommt, das im allgemeinen dem Leser viel leichter erkennbar ist als dem Verfasser und sich vielfach so weit ausgewirkt hat, daß dieser eine ganz spezielle Hypothese als die einzig mögliche und wirksame ansieht. Anderseits bringt es der Gegenstand mit sich, daß Kenntnisse auf zahlreichen Wissensgebieten verwertet werden müssen, neben solchen aus den Gebieten der Geologie und Geophysik auch solche aus der reinen Physik, der Chemie, der Mineralogie, der physikalischen Chemie, der Paläontologie, der Klimakunde, der Geodäsie

¹⁾ Geotektonische Hypothesen. Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin 1924.

und mancher anderer. Je nach seinem Hauptgebiet wird der Autor bald die einen, bald die anderen Ergebnisse in den Vordergrund stellen. Im übrigen ist es wohl ohne weiteres klar, daß es sich im folgenden vielfach um Hypothesen handelt, die der Nachprüfung und der Verbesserung mehr bedürfen, als die meisten Abschnitte des Handbuches.

§ 246. Der Ausgangszustand und die Zwischenzustände der Erde. Die verschiedenen geotektonischen Hypothesen nehmen verschiedenartige Zeitpunkte für den Beginn der behandelten Vorgänge an. Wohl bei allen kann man als Urzustand eine heiße, fluide Erde ansehen. Aber schon die chemischen und physikalischen Vorgänge bei der Abkühlung und der dann folgenden Kristallisation bilden die Grundlagen für die erste Gruppe von geotektonischen Hypothesen, auf die wir später eingehen wollen. Bei der Mehrzahl der Hypothesen wird angenommen, daß sich dann eine kristalline Kruste bildete. Hier trennen sich abermals zwei Gruppen von Hypothesen, von denen die eine voraussetzt, daß schon damals die Unterschiede zwischen Meeresböden und Kontinenten vorhanden waren, während die andere, größere diese Scheidung erst später annimmt und verschiedenartig zu erklären sucht. Der weitaus größte Teil der Hypothesen setzt voraus, daß der Ausgangszustand im wesentlichen der gleiche war wie heute, nur daß die vertikalen Unterschiede auf der Erdkruste geringer waren, daß man also den Ausgangszustand im wesentlichen so erhält, daß man die Erdkruste „glättet“, so daß alle Unterschiede der Erdoberfläche mehr oder minder verschwinden.

Zweifelloso liegt hierin eine nicht unbedenkliche Voraussetzung, denn einmal haben die gegenüber den uns bekannten Katastrophen früher zweifellos viel stürmischer verlaufenden Vorgänge, insbesondere im Anfangszustand der Erde, sicher erhebliche Störungen des regelmäßigen Aufbaues der Erde veranlaßt, so daß der „Anfangszustand“ schon stark gestört war, dann sucht sich eine vorhandene Störung des hydrostatischen Gleichgewichtes, wie es die Unterschiede der Erdoberfläche sind, auszugleichen, so daß eine Tendenz zum „Glätten“ der Erdkruste besteht, nicht eine zum Schaffen von neuen Gegensätzen, soweit keine anderen Kräfte diese bewirken.

Gehen wir nun weiter in der Betrachtung des Zustandes der Erde, so kommen wir auf Konfigurationen, die bei einzelnen Theorien als Anfangszustand, bei anderen als Endzustand und wohl bei den meisten als ein Glied zwischen beiden benutzt werden. Die Frage nach dem Aussehen der Erdkruste in diesen Epochen kann nur durch gemeinsame Benutzung von geologischen, paläontologischen, geophysikalischen und anderen Ergebnissen beantwortet werden. Sie wird in Band 2 des Handbuches eingehender behandelt. Hier müssen wir uns auf die Zusammenstellung einiger wichtiger Ergebnisse beschränken.

Durch das Zusammenwirken zahlreicher naturwissenschaftlicher Teildisziplinen ist sichergestellt, daß sich das Aussehen der Erdkruste im Laufe der geologischen Epochen erheblich geändert hat. Große Teile unserer heutigen *Kontinente waren zeitweise von Wasser überflutet*; allerdings scheint es sich in vielen Fällen um *Flachsee* gehandelt zu haben. Umgekehrt zeigen unter anderem Wanderungen von Landtieren, daß Teile von Kontinenten, die heute durch Meere getrennt sind, zeitweise durch Landmassen verbunden gewesen sein müssen. Die Ansichten verschiedener Autoren gehen zwar in Einzelheiten auseinander, zeigen aber in großen Zügen völlige Übereinstimmung. Eine übersichtliche Zusammenstellung verschiedener Ansichten hat A. WEGENER¹⁾ für

¹⁾ Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 4. Aufl. Verlag Vieweg, Braunschweig 1929.

eine Reihe von solchen *Landverbindungen* graphisch gegeben (Fig. 157). Man erkennt daraus, daß im Kambrium eine ganze Reihe heute nicht mehr vorhandener Landverbindungen entstanden ist, die — vielleicht mit einer vorübergehenden Störung im Perm — bis zu Beginn der Jurazeit bestanden haben, und daß sich erst in den letzten geologischen Epochen der heutige Zustand herausgebildet hat.

Keinerlei Übereinstimmung herrscht dagegen über den *Vorgang* bei dieser Veränderung. Während ein Teil der Hypothesen *vertikale Verschiebungen* annimmt, also Aufsteigen des Meeresbodens beziehungsweise Versinken von Kontinenten, setzen andere Hypothesen im wesentlichen *horizontale Bewegungen* voraus, sei es unter Zerreißen des Landes, sei es unter Ausdehnung in horizontaler und Zusammenziehung in vertikaler Richtung. Unter diesen Umständen

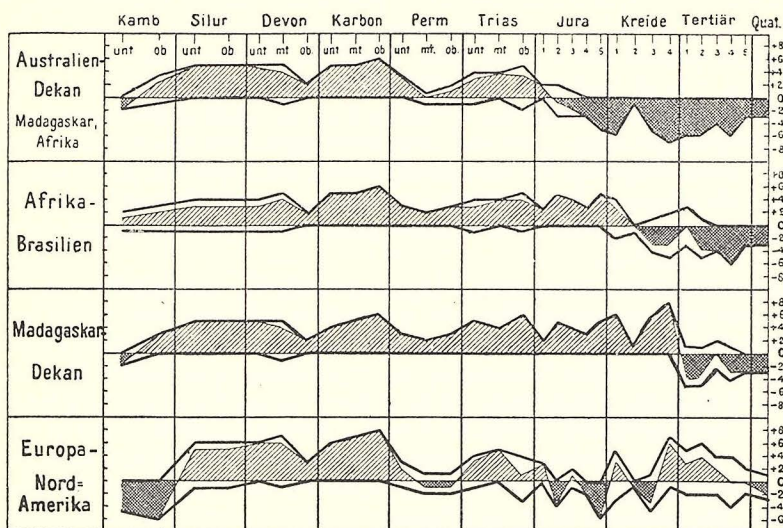


Fig. 157

Ansichten über die Existenz der am linken Rande angegebenen Landbrücken in verschiedenen geologischen Epochen. Nach oben von den Mittellinien aus sind die Zahlen der Forscher aufgetragen, welche die betr. Verbindung annehmen, nach unten die Zahl, welche sie leugnet. Die Differenz ist einfach schraffiert (nach oben), wenn erstere überwiegen, doppelt schraffiert (nach unten), falls die Mehrzahl der Ansicht ist, daß eine Landverbindung in der betr. Epoche nicht existierte. Nach A. WEGENER („Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“)

sind Feststellungen, ob Teile der Erdkruste horizontale Bewegungen gegeneinander ausführen, von besonderem Werte. Auf deren Bedeutung hat zuerst A. WEGENER hingewiesen. Er hat auch als erster das zur Zeit noch sehr spärliche Material gesichtet. Wie wir im nächsten Paragraphen sehen werden, treten in der Tat an vielen Stellen der Erde horizontale Bewegungen auf.

Einen wesentlichen Anhaltspunkt für das Aussehen der Erdkruste in verschiedenen Epochen bieten die *Klimazeugen*¹⁾. Diese können einmal durch Pflanzen und Tiere, dann aber auch durch physikalische und chemische Vorgänge (Wirkungen von Gletschern, Wüsten und anderem) gebildet werden. Es ist nun sehr wesentlich, daß alle Klimazeugen in großen Zügen zum gleichen

¹⁾ Näheres hierüber in Band 2 des Handbuches.

Bilde über die Klimazonen führen, denn es ist keineswegs selbstverständlich, daß Tiere oder Pflanzen, die heute nur in einem bestimmten Klima vorkommen, auch in früheren geologischen Epochen *nur* in dem gleichen Klima vorkommen konnten; einmal können damals völlig andere Lebensverhältnisse (Strahlung, Zusammensetzung der Atmosphäre u. a.) geherrscht haben, dann waren damals möglicherweise auch die Wirkungen des Klimas auf die Lebewesen andere („Anpassung“).

Auch bei diesem Problem müssen wir uns hier auf eine Feststellung des Wesentlichsten beschränken, da eine genauere Darstellung in Band 9 des Handbuches vorgesehen ist. Es ergibt sich, daß das *Klima in früheren geologischen Epochen* zum Teil erheblich anders war als heute. So hatte z. B. Europa während der meisten Epochen der Erdgeschichte offenbar wesentlich wärmeres Klima als heute; erst im Tertiär trat die Hauptänderung ein. Im Prinzip gilt ähnliches für die Nordpolargebiete. Spitzbergen hatte im Karbon anscheinend ein Klima, das dem heutigen subtropischen entspricht. Der Pflanzenwuchs während der Jurazeit entspricht sogar dem in den Tropen von heute. Noch im Frühtertiär besaß es Wälder, wie wir sie heute in Mitteleuropa finden, und erst in den folgenden Zeiträumen erfolgte die Abkühlung auf den heutigen Zustand. Umgekehrt war anscheinend Südafrika in früheren Epochen stellenweise von Eis bedeckt. Eine wesentliche Förderung dieser Probleme in geophysikalischer Richtung verdanken wir KÖPPEN und WEGENER¹⁾. Für die Deutung wurden wiederum verschiedenartige Annahmen herangezogen, mit denen wir uns beschäftigen müssen. Schon relativ früh war der naheliegende Schluß gezogen worden, daß Polwanderungen die Hauptursachen für diese Erscheinungen seien.

Bei Benutzung des Wortes „*Polwanderung*“ müssen wir etwas Vorsicht walten lassen, denn es bestehen zwei in geophysikalischem Sinne völlig verschiedene Möglichkeiten: Einmal kann sich die Erdachse im Erdinnern verlagern, dann aber wäre es auch denkbar, daß sich eine relativ dünne Schale der Erdkruste über dem Erdinnern verschiebt. In beiden Fällen wird der Pol eine gewisse Bahn auf der Erdoberfläche beschreiben, wir erhalten „*Polwanderungen*“. Welcher von beiden Fällen eintritt, muß Gegenstand besonderer Untersuchungen sein. Das weitergehende geophysikalische Problem der Polbewegungen selbst wird in Band 1 behandelt.

Jedenfalls zeigen die genannten Tatsachen, daß die Pole mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ausgedehnte Bahnen auf der Erdkruste beschrieben haben. Es ist dies auch schon deswegen keineswegs unwahrscheinlich, weil die Beobachtungen der letzten Jahrzehnte (vgl. Band 1) zweifelsfrei ergeben haben, daß die Pole auch heute noch über die Erde wandern, und zwar in der letzten Zeit um etwa 14 cm pro Jahr; der Nordpol verschiebt sich in der Richtung auf Grönland. Mit anderen Worten: Entweder verschiebt sich die Erdachse tatsächlich um diesen Betrag, oder die Erdkruste, wenigstens deren größter Teil, bewegt sich über ihrer Unterlage entgegengesetzt, Grönland bewegt sich auf den Nordpol zu.

Die Feststellung derartiger Polwanderungen in früheren Epochen kann nur durch Untersuchungen über Klimaänderungen erfolgen und ist durch verschiedene Umstände sehr erschwert. Einmal wissen wir nicht sicher, welcher Teil der Klimaänderungen reell und welcher durch Änderung der Konstitution von Pflanzen und Tieren bedingt ist. Dann können aber auch zahlreiche andere Ursachen außer Polwanderungen das Klima in mehr oder minder großen Gebieten beeinflussen; hierauf wird in Band 9 eingegangen. Schließlich ist uns

¹⁾ Die Klimate der geologischen Vorzeit. Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin 1924.

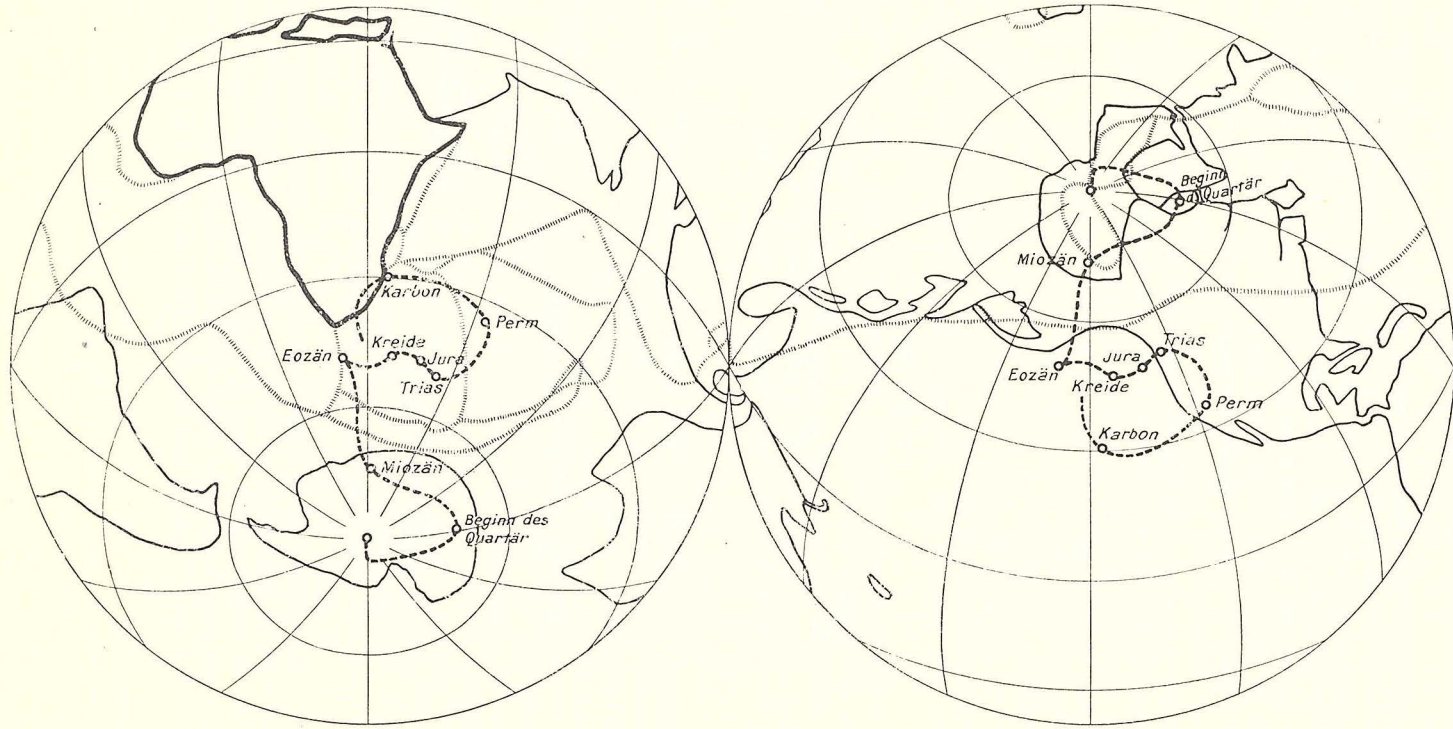


Fig. 158

Polbahn, bezogen auf Afrika, nach KÖPPEN-WEGENER. Schraffiert sind die Grenzen der Kontinente im Karbon, ausgezogen für die Jetztzeit. (Aus: „Die Klimate der geologischen Vorzeit“)

auch die Lage der Kontinente in den verschiedenen Epochen zueinander nicht genau bekannt. Wie wir oben sahen, müssen wir hier ja mit Änderungen im Laufe der Zeit rechnen. Zeichnen wir etwa auf einer heute gültigen Karte eine Verbindungslinie der Punkte ein, auf welchen der Pol einmal gelegen hat, so bekommen wir nicht die Polbahn, denn die Punkte haben ja vermutlich ihre Lage zueinander verändert. Zeichnen wir umgekehrt die Polbahn ein, so müssen wir einen Globus ohne Angabe der Figuration der Kontinente benutzen, also einen solchen, der nur ein Gradnetz trägt. Eine solche Darstellung scheint übrigens seither noch nicht gegeben worden zu sein. Figur 158 zeigt die Bahn

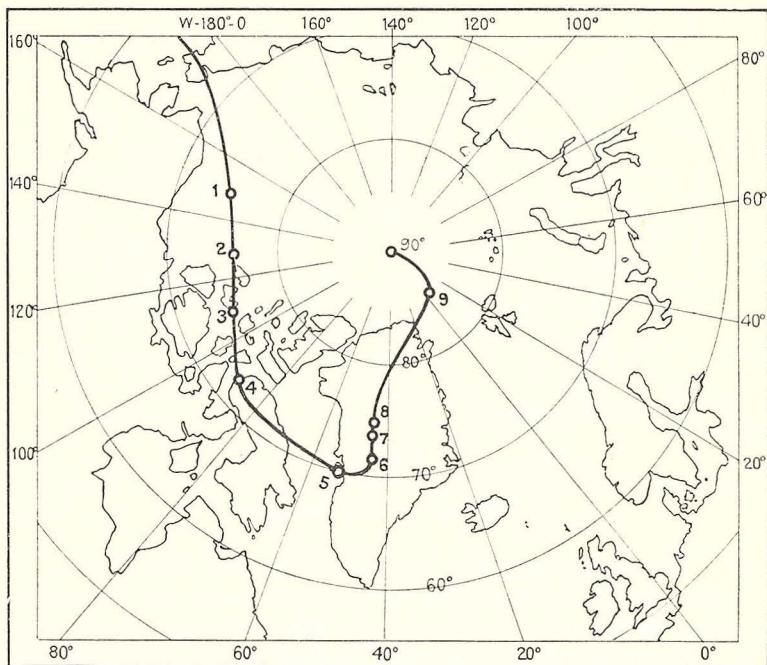


Fig. 159

Weg des Nordpoles, bezogen auf Europa. 1 Miozän, 2—4 Pliozän, 5 Günz (ca. — 500 000 Jahre), 6 Mindel (ca. — 450 000), 7 Riß (— 200 000), 8 Würm (— 100 000), 9 Balt. Vorstoß (— 25 000), nach W. KÖPPEN. (Aus: KÖPPEN-WEGENER, „Die Klimate der geologischen Vorzeit“)

des Nordpoles in bezug auf Afrika, Figur 159 insbesondere dessen Bahn in den letzten Epochen und Figur 160 die Wanderung des Südpoles nach A. WEGENER, dessen Darstellung vielleicht in einzelnen Punkten etwas subjektiv ist wie jede derartige Darstellung, aber vermutlich in den Hauptzügen zutrifft, sofern die Voraussetzungen, die wir mehrfach erwähnten, richtig sind. Figur 160 zeigt sehr schön die Unterschiede der Polbahnen bei Zugrundelegung verschiedener Bezugspunkte. Im vorliegenden Falle ist die WEGENERSche Theorie als richtig vorausgesetzt. Bei anderen Voraussetzungen ergeben sich andere relative und andere absolute Polbahnen, die allerdings in allen Fällen in den Hauptpunkten übereinstimmen.

Die Kombinationen der verschiedenen Ansichten über die Lage der Kontinente in vertikaler und horizontaler Richtung sowie über die Lage der Pole

in den verschiedenen geologischen Epochen ergeben die verschiedenen Bilder über das Aussehen der Erdoberfläche, die den geotektonischen Hypothesen zugrunde gelegt werden müssen.

Einen Anhaltspunkt über die Polwanderungen liefern vielleicht später einmal die Feststellungen, in welcher Richtung Gesteine verschiedenen Alters an ihrer Fundstelle magnetisiert sind. Untersuchungen hierüber, die allerdings bisher nur in geringer Zahl vorliegen, zeigten tatsächlich systematische Änderungen der magnetischen Achse, die vermutlich jeweils nach einem magnetischen Pol zeigte¹⁾.

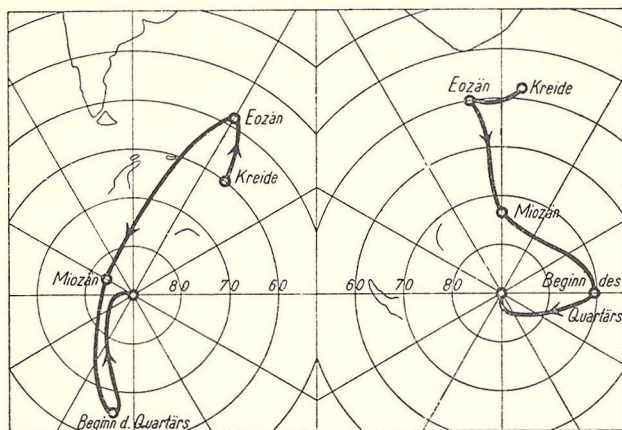


Fig. 160

Wanderungen des Südpoles seit der Kreide nach A. WEGENER, links bezogen auf Südamerika, rechts auf Afrika

§ 247. Der Endzustand für die geotektonischen Hypothesen. Das Ziel der geotektonischen Hypothesen war seither, von einem der im vorigen Paragraphen angegebenen Anfangszustände aus den derzeitigen Zustand der Erde abzuleiten. Als gegeben nahm man also Anfangs- und Endzustand an, als gesucht die Vorgänge zwischen beiden. Aber auch, wenn wir den richtigeren Weg gehen und den Endzustand abzuleiten versuchen, der sich ergibt, wenn wir die Wirkung der im ersten Abschnitt dieses Bandes erörterten Kräfte auf einen Anfangszustand untersuchen (also: gegeben Anfangszustand und Vorgang, gesucht der Endzustand), müssen wir zum Vergleich zwischen theoretischem und wirklichem Zustand den derzeitigen Aufbau der Erde kennen. Die Einzelheiten sind in Band 2 und zum Teil auch in Band 1 des Handbuches eingehend behandelt, so daß wir hier nur kurz die Ergebnisse zusammenzustellen brauchen.

a) **Kontinente und Ozeane.** Sowohl in physikalischer wie in biologischer Hinsicht zerfällt die Erdoberfläche in zwei Teile: Kontinente und Ozeane. Während aber die biologische Grenze durch die Grenze des Wassers gegeben ist — zwischen tieferen und flacheren Teilen bestehen nur Unterschiede zweiten Grades —, gehören physikalisch Teile der Flachsee, der „Schelf“, zum Kontinent. Figur 161 zeigt etwa die physikalischen Grenzen der Kontinente einschließlich der Schelfe. Die Untersuchung der Erdbebenwellen (Band 4) zeigte aber weiter, daß sich der Untergrund des Pazifischen Ozeans sowohl dem Aufbau

¹⁾ M. MATUYAMA, On the direction of magnetisation of basalt in Japan. Proc. Imp. Acad. Tokyo, 5, 203, 1929.

wie den physikalischen Eigenschaften nach mehr von dem Untergrund der übrigen Ozeane unterscheidet als letzterer von der Erdkruste unter den Kontinenten. Insbesondere scheint der Boden des Atlantik lediglich dünner zu sein als die entsprechenden Schichten unter Eurasien und Amerika, sich sonst aber nicht wesentlich von diesen zu unterscheiden.

b) **Niveauunterschiede.** Die Grenze zwischen Kontinenten und Ozeanen ist eine Folge des Reliefs der Erdkruste. Auf der einen Seite haben wir zwei große Gebirgsgürtel — außer zahlreichen kleineren Gebirgszonen —, von denen sich der eine nördlich des Äquators in westöstlicher Richtung erstreckt, der andere die Westküste Amerikas begleitet, auf der anderen Seite haben wir eine

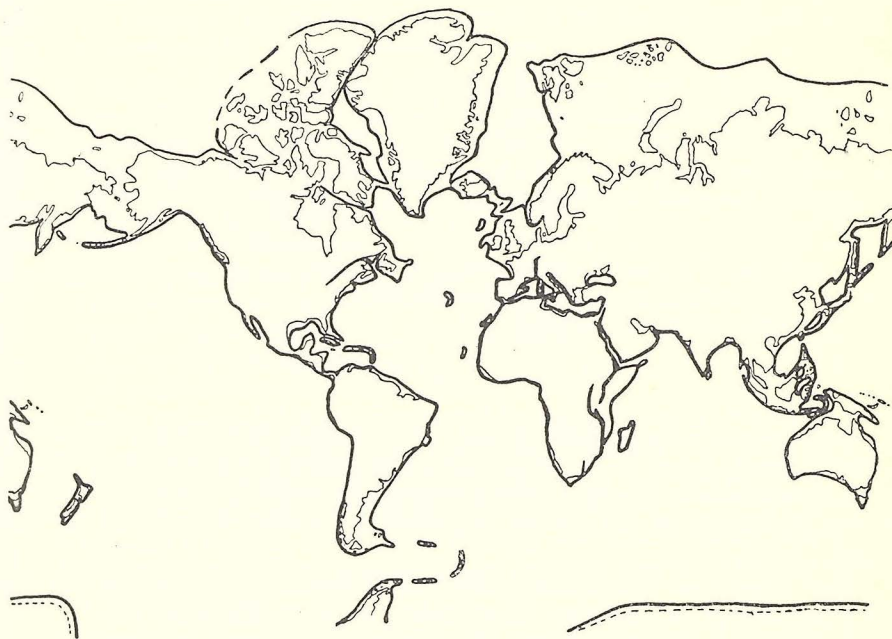


Fig. 161

Kontinente einschließlich der Schelfe nach A. WEGENER

Reihe von Tiefseegräben. Im übrigen haben die Messungen des „Meteor“ gezeigt, daß der Boden des Atlantischen Ozeans ähnliche, vielleicht noch stärkere Höhenunterschiede zeigt, wie die Kontinente (Näheres in Band 1). Für die übrigen Ozeane fehlen noch entsprechende Messungen, doch sind auch im Pazifischen Ozean „Täler und Gebirge“ festgestellt worden.

Trägt man die prozentuale Häufigkeit der verschiedenen Höhenstufen auf, so erhält man Figur 162, welche zeigt, daß zwei bevorzugte Niveaus vorhanden sind. Das gleiche läßt sich auch, allerdings weniger deutlich, aus der hypsometrischen Kurve (Band 1) erkennen.

c) **Geologischer Aufbau.** Erkenntnisse über den geologischen Aufbau der Erdkruste liefern einmal direkte Untersuchungen, dann auch die Ergebnisse der Vulkan- und Erdbebenforschung. Die beiden letzteren zeigen in ganz überraschender Weise, daß die größte Zahl der Vulkane sowohl wie der Erdbeben auf die Umrandung des Pazifischen Ozeans entfällt, und daß eine zweite Zone geringerer Aktivität den großen Gebirgsgürtel im Süden Eurasiens begleitet

Die zuerst erwähnte Zone hat zur Folge, daß die pazifischen Küsten einen völlig anderen Typus aufweisen als die der übrigen Ozeane, so daß man den „*pazifischen Küstentypus*“ dem „*atlantischen Küstentypus*“ gegenüberstellt, bei welchem der Übergang vom Kontinent zum Ozeanboden völlig stetig erfolgt. Während hier die Bedeckung mit Wasser der einzige Unterschied zwischen Kontinent und Ozean zu sein scheint, ist der Pazifische Ozean durch eine erdbeben-, vulkan- und gebirgsreiche Zone begrenzt, und seine Umrandung ist infolgedessen vielfach durch außergewöhnlich große Niveauunterschiede ausgezeichnet. Die geologischen und physikalischen Grenzen fallen nicht überall mit der Schelfgrenze zusammen. Erstere verlaufen z. B. längs der Küste von Neu-Guinea und Neu-Seeland (vgl. z. B. Fig. 202).

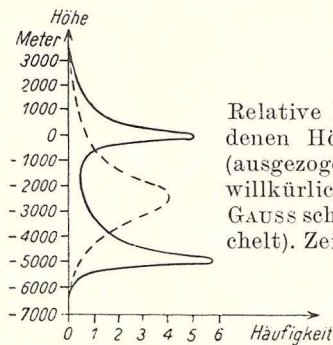


Fig. 162

Relative Häufigkeit der verschiedenen Höhen der Erdoberfläche (ausgezogen) und Verteilung bei willkürlicher Anordnung nach dem GAUSS'schen Fehlergesetz (gestrichelt). Zeichnung von A. WEGENER

Die Untersuchungen zeigen weiter, daß die geologisch tätigen Zonen (vgl. S. 398 ff. sowie Band 2) — soweit genauere Feststellungen möglich sind — in den verschiedenen Epochen verschiedene Lagen besaßen. Insbesondere haben sie sich in Europa in den letzten geologischen Epochen vorwiegend südwärts bewegt.

Eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten hat H. STILLE¹⁾ festzustellen versucht, und zwar kam er zu folgenden Ergebnissen (vgl. auch Abschnitt III):

1. Das „*orogene Zeitgesetz*“. Alle Gebirgsbildung ist an verhältnismäßig wenige und zeitlich engbegrenzte Phasen von mehr oder weniger erdweiter Bedeutung gebunden.

2. Das „*orogene Gleichzeitigesetz*“. Die Gebirgsbildung tritt gleichzeitig in den verschiedensten Erdgebieten auf.

3. „*Satz von der Gleichzeitigkeit der orogenen Formen*“. Die Entstehung bestimmter Baustile der Erde ist nicht das Charakteristikum bestimmter Zeiten, sondern in allen orogenen Zeitphasen können sich alle Baustile ausgebildet haben.

4. „*Satz von der Verknüpfung der orogenen Formen*“. Es ist keinerlei scharfe Scheidung der Strukturkategorien der Gebirge möglich.

5. „*Satz von der orogenen Hochbewegung*“. Alle Gebirgsbildung, auch des Bruchfalten- und Blockgebirges, erfolgt unter Aufwärtsbewegung gegenüber dem ozeanischen Spiegel.

6. „*Satz von der Einheitlichkeit der orogenen Kräfte*“. Eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen einer tangentiellen Gebirgsbildung, welche zum Faltengebirge führt, und einer aus rein vertikal wirkenden Kräften hervorgehenden

¹⁾ Grundfragen der vergleichenden Tektonik. Berlin 1925.

Gebirgsbildung, die das Schollengebirge schaffen soll, ist unmöglich. Vielmehr muß die gleiche Kraft Falten- und Schollengebirge hervorrufen.

7. „Satz von der Bedingtheit der orogenen Formen.“ Die Art der Gebirgsbildung ist in erster Linie durch die Beschaffenheit des Untergrundes und insbesondere seine Mobilitätsverhältnisse bedingt.

8. „Die epirogene Gleichzeitigkeitsregel.“ Die Veränderungen im Gange der epirogenen Bewegungen zeigen in den verschiedensten Erdgebieten erhebliche gleichzeitige Gleichsinnigkeiten.

9. Zu ihrer Erklärung können nicht Ursachen von örtlicher Bedeutung herangezogen werden, vielmehr sind allgemeiner verbreitete und allgemeiner wirksame Ursachen anzunehmen. Jedenfalls kann das *Hauptmotiv nicht in örtlichen Verhältnissen* gesucht werden.

10. Die Orogenese, die in der Gebirgsbildung zum Ausdruck kommt, und die Epirogenese, die Festländer aufsteigen und Geosynklinalen sinken läßt, haben qualitativ gleiche, quantitativ verschiedene Ursachen; aus der quantitativen Verschiedenheit erklärt sich die Verschiedenartigkeit der Wirkungen. Der epirogene Druck ist nichts anderes als ein abgeschwächter orogener, der orogene ein verstärkter epirogener.

11. Die Einzelbilder der Gesamttektonik erscheinen uns als Funktion

α) der Intensität der tektonischen Kräfte (Faktor „Druck“),

β) der Reaktionsfähigkeit des betroffenen Materials (Faktor „Konstitution“),

γ) gewisser Lageverhältnisse (Faktor „Lage“).

Dabei ist die tektonische Erscheinungswelt im wesentlichen in den ersten beiden Faktoren, also dem Verhältnis von Druck und Reaktionsfähigkeit, begründet. Orogenese ist die Reaktionsform des Untergrundes auf starken episodischen, Epirogenese diejenige auf schwächeren, säkularen Druck.

Schwacher Druck kann in einem Material von ungewöhnlich großer Reaktionsfähigkeit dieselben tektonischen Bilder schaffen, wie in normalem Material erst der starke Druck.

12. Prinzip der Arbeitsökonomie. Die geotektonischen Vorgänge erfolgen unter Wahl solcher Formen und unter Verlegung an solche Orte und hier wieder in solche Materialien, daß sie mit einem Minimum von Arbeitsaufwand geschehen können.

d) Isostasie. Die Untersuchungen über die Schwere haben ergeben, daß im allgemeinen in einer gewissen Tiefe, deren Größe je nach den Voraussetzungen zwischen etwa 50 und 120 km gefunden wurde, „isostatisches Gleichgewicht“ herrscht, d. h. daß in dieser Tiefe alle Unterschiede der oberen Schichten nahezu kompensiert sind. Wo sich an der Erdoberfläche Gebirge befinden, wird deren Gewicht durch geringeres spezifisches Gewicht der Massen zwischen der genannten Fläche und der Oberfläche ausgeglichen; umgekehrt müssen in einer Gesteinssäule, die an einer tiefen Stelle des Meeresbodens endet, schwerere Massen enthalten sein. Einzelheiten und Deutung dieser Tatsache werden in Band I gegeben; wir können uns hier mit der Feststellung der für die geotektonischen Theorien außerordentlich wichtigen Tatsache begnügen, daß Abweichungen vom isostatischen Gleichgewicht nur lokal vorkommen. Es folgt daraus direkt, daß bei Massenbewegungen in größeren Gebieten das mittlere Gewicht der Gesteinssäulen, gegebenen Falles + Wasserbedeckung, vor und nach dem Vorgang gleich sein muß. Ist h die Höhe einer Schicht, ρ deren Dichte, so gilt

für die Massenanordnung von der isostatischen Ausgleichsfläche ab nach oben vor und nach der Veränderung die Beziehung

$$\begin{array}{ccc} & \text{vorher} & \text{nachher} \\ h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + h_3 \rho_3 + \dots & = & h_1' \rho_1' + h_2' \rho_2' + h_3' \rho_3' + \dots \end{array} \quad (173)$$

oder in mathematischer Form

$$\Sigma h \rho = \Sigma h' \rho' \quad (174)$$

Es folgt hieraus ohne weiteres, daß ein Absinken von Schichten ohne entsprechende Zufügung von schwereren Massen oder ohne Horizontalbewegungen nicht möglich ist; reine Vertikalbewegungen größerer Schollen widersprechen der Isostasie, denn beim Absinken müssen in der Tiefe Gesteinsmassen seitlich abfließen, deren Gewicht auch durch Zuströmen von Wasser an der Oberfläche nicht kompensiert werden kann, andererseits muß eine Hebung größerer Schollen ein Zuströmen von Material in der Tiefe bedingen und somit eine Erhöhung des Gewichtes der ganzen Gesteinssäulen. *Vertikalbewegungen größerer Schollen müssen daher stets von Deformationen oder Horizontalbewegungen begleitet sein.*

e) **Temperatur.** Die Untersuchungen über die Änderung der Temperatur mit der Tiefe haben ergeben, daß diese nicht nur von Ort zu Ort verschieden ist, sondern auch in verschiedenen Teilen der Erde erhebliche Abweichungen zeigt. Insbesondere scheint es sehr wahrscheinlich, daß die Zunahme der Temperatur unter den Meeresböden, die unter Umständen 2000° kälter sind als der Kontinentalboden in gleicher Tiefe, schneller erfolgt als im Kontinentalboden, und zwar vielleicht von der Größenordnung 4° bis 5° pro 100 m gegenüber meist rund 3° in ersterem. Sichere Messungen liegen leider nur aus wenigen Gebieten in Kontinenten vor (vgl. Band 2).

Wie die Änderung in größerer Tiefe erfolgt, können wir nur unter gewissen Annahmen berechnen (vgl. Band 2). Die Beobachtungen zeigen, daß in den obersten 2 km keine wesentliche Änderung des Temperaturgradienten vorhanden ist. Trotzdem muß man damit rechnen, daß die Zunahme in größerer Tiefe immer langsamer wird. 1000° werden wohl in rund 50 km Tiefe erreicht, 2000° wohl kaum vor 200 km Tiefe, darunter steigt die Temperatur vermutlich nur sehr langsam weiter.

f) **Dichte.** Über die Dichte wissen wir insofern mehr, als wir nicht nur ihren Wert für eine große Zahl von Punkten der Erdoberfläche kennen, sondern auch ihren Mittelwert für die ganze Erde mit 5,52: Da die Werte an der Oberfläche im allgemeinen zwischen 2,7 (hochgelegene Teile) und 3,1 (Pazifikboden)

Tabelle 50
Dichte im Erdinnern

Tiefe in km	Dichte unterhalb		
	Eurasien, Amerika	Atlantik	Pazifik
0	2,8	2,85	3,05
10	2,8	2,9	3,1
30	2,9	3,1	3,1
60	3,2		
200	3,4		
1000	4½		
2000	5—6		
2900	6—8		
über 2900	9—11		

liegen — die Beobachtungen bestätigen hier unsere oben aus der Existenz der Isostasie gezogenen Schlüsse — folgt, daß im Erdinnern Massen mit wesentlich größerer Dichte vorhanden sein müssen. Die Kombination aller zur Zeit benutzbaren Grundlagen ergibt etwa die in Tabelle 50 und 51 angegebenen Werte.

Tabelle 51
Dichte der Erdkruste¹⁾ (Mittelwerte)

Gebiet	Höhe km	Dichte
Pazifischer Ozean	— 4,5	3,09
Atlantischer Ozean	— 4,1	2,89
Kontinente	0,0—0,5	2,82
Kontinente	0,5—1,1	2,77
Kontinente (Gebirge)	1,1—2,1	2,77

g) Geschwindigkeit elastischer Wellen. Die Größen, deren Wert im Erdinnern wir mit der relativ größten Genauigkeit kennen, sind die Geschwindigkeiten elastischer Wellen, die wir aus den Aufzeichnungen von Erdbeben ableiten können (vgl. Band 4). In den allerobersten Schichten hängen die Werte natürlich von dem vorhandenen Gestein ab, darunter werden sie in verschiedenen Gebieten immer gleichartiger. Bezeichnen wir mit *V* die Geschwindigkeit von Longitudinalwellen, mit *ℑ* die der Transversalwellen, so ergeben sich etwa die in Tabelle 52 angegebenen Werte.

Tabelle 52
Mittlere Geschwindigkeiten longitudinaler (*V*) und transversaler Erdbebenwellen (*ℑ*) in km/sec in verschiedenen Tiefen (km)

Gebiet	Tiefe	V	ℑ	Tiefe	V	ℑ	Tiefe	V	ℑ
Mittel- und Nord-deutschland .	< 10	6,0	3,2	15—40	6¾	?	50	8,0	4,4
Süddeutschland	< 30	5,5	3,2	30—40	6½	3½	50	8,0	4,4
Alpen	< 35	5,4	3,2	35—40	6¼	?	50	8,0	4,4
England	< 10	5,4	3,3	10—30	6¼	3¾	50	7,8	4,4
Japan	< 20	5—5½	3,2	20—40	6—6¼	3¾	50	7½—8	4,5
Pazifik	< 10	(7)	(4)	> 20	(7¾)	(4¼)	50	8,0	4,4

in allen Teilen der Erde:

Tiefe	50	60	70	100	500	1000	1300	2000	2900	4000	6370
V	8,0	8,1	8,0	8,1	9	11	12½	13¼	13¼ 8½	9½	11
ℑ	4,4	4,4	4,4	4,5	5	6	6½	7½	7½	sehr klein	

Die Untersuchungen an Oberflächenwellen zeigen ferner, daß die Schichtgrenze, welche unter den Kontinenten in 40 bis 50 km Tiefe liegt, unter dem Atlantischen Ozean in rund der halben Tiefe liegen muß, und daß unter dem pazifischen Ozean die oberste Schicht noch wesentlich dünner ist, für die Praxis vermutlich

¹⁾ Mittelwerte auf Grund der Untersuchungen von H. S. WASHINGTON. Bull. Geol. Soc. of America, 33, 375, 1922.

überhaupt vernachlässigt werden kann. Wesentlich wäre für uns ferner eine Bestätigung der von SUDA gefundenen Tatsache, daß in Japan alle Schichten nach dem Pazifischen Ozean zu dünner werden. Auch die Seismogramme von kalifornischen Erdbeben sprechen dafür, daß dort mindestens eine der Schichtgrenzen flacher liegt als in Europa, doch konnten bisher beweiskräftige Ergebnisse nicht erzielt werden.

Zum Vergleich mit den in der Natur vorkommenden Wellengeschwindigkeiten sind in Tabelle 53 einige für bestimmte Gesteine gefundene Werte zusammengestellt, wobei man jedoch berücksichtigen muß, daß die im Laboratorium gefundenen Werte unter anderen Versuchsbedingungen (Größe der Kraft, Druck, Temperatur) gewonnen sind, also höchstens für die obersten Erdschichten Anhaltspunkte liefern (Näheres in Band 2 bzw. 4).

Tabelle 53

Wellengeschwindigkeiten V (longitudinal) in Gesteinen in km/sec

a) Berechnete Werte

Gestein	Bei normalem Druck (Erdoberfläche)	Bei etwa 10000 Atm. Druck (etwa 35 km Tiefe)
Granit	$4\frac{1}{4}$	$5\frac{3}{4}$
Basalt	5	6
Basalt (Glas)	—	$6\frac{1}{2}$
Gabbro	6	$7\frac{1}{4}$
Dunit	8	$8\frac{1}{4}$

b) Beobachtete Werte

Gestein	Beobachtet V (Erdoberfläche)
Sand	$\frac{3}{4}$ — $1\frac{1}{4}$
Ton	$1\frac{3}{4}$ —2
Kreide	$2\frac{1}{4}$
Sandstein	$2\frac{1}{2}$
Eruptiva	$5\frac{1}{2}$
Basalt	5,6

h) **Kompressibilität und Rigkeit.** Kennt man die Geschwindigkeit longitudinaler und transversaler Erdbebenwellen, sowie die Dichte im Erdinnern, so läßt sich sowohl der Inkompressibilitätsfaktor wie der Rigeitskoeffizient als Funktion der Tiefe berechnen. Ersterer ist der reziproke Wert der Volumenänderung, die ein Kubikzentimeter der betreffenden Substanz erfährt, wenn der Druck um 1 Dyn geändert wird; er ist also um so größer, je weniger kompressibel (zusammendrückbar) der Körper ist, und ist ein Maß für den Widerstand, welcher der Körper Volumenänderungen entgegensetzt. Der Rigeitsmodul ist proportional dem Drehmoment, das man anwenden muß, um einen Draht von bestimmten Dimensionen um einen gewissen Winkel zu verdrehen; er ist also ein Maß für den Widerstand, welcher der betreffende Körper plötzlichen Formänderungen entgegensetzt.

Wie in Band 2 des Handbuches eingehender dargelegt werden soll, gibt es außer der Berechnung aus den Wellengeschwindigkeiten und der Dichte

noch eine Reihe von weiteren Möglichkeiten, über die Righeit im Erdinnern Aufschluß zu erhalten; sie beeinflusst die Gezeiten des Meeres und der festen Erde, die Polschwankungen (vgl. Band 1), sowie einige weniger leicht verwertbare Erscheinungen. Dagegen ist der Inkompressibilitätsfaktor bisher nur aus Beobachtungen über die Longitudinalwellengeschwindigkeit unter Benutzung der für die Dichte und die Righeit gefundenen Werte bestimmt worden. Tabelle 54 gibt einen Überblick über die wahrscheinlichsten Werte der beiden Größen im Erdinnern.

Tabelle 54

Righeitskoeffizient μ und Inkompressibilitätsfaktor k im Erdinnern
Alle Zahlen sind mit 10^{11} zu multiplizieren. Einheit Dyn/cm²

Tiefe km	Righeitsfaktor				Inkompressibilitätsfaktor			
	Mittel- deutschland	Alpen	Japan	Pazifik ca.	Mittel- deutschland	Alpen	Japan	Pazifik ca.
10	3 1/4	2 3/4	2 3/4	5	6	4 1/2	4	8
30	3 1/2	3 1/2	4	6	8	8	6	11
50	6 1/2				12			
100	7				14			
1200	etwa	20	} Zunahme stetig		etwa	40	} Zunahme stetig	
2900	„	30			„	60		
2900 6370	} sehr klein, wahrscheinlich unter 2				} vermutlich über 60			

i) Viskosität und Fließfähigkeit. Entgegen der üblichen Ansicht spielen die Kompressibilität und die Righeit keine wesentliche Rolle bei tektonischen Vorgängen. Viel wichtiger ist die Viskosität und insbesondere die Fließfähigkeit. Leider wissen wir über deren Größen im Erdinnern relativ wenig, und auch die theoretischen Untersuchungen sind noch im Anfangsstadium. Der Viskositätskoeffizient ν ist definiert durch $\nu = \mu \cdot t$, wo μ der Righeitsfaktor ist und t die Zeit, in der die Spannung S , die durch die konstante Kraft F hervorgerufen wird, infolge des Fließens auf 1:e sinkt (Relaxationszeit). Eine eingehende Darstellung soll in Band 2 erfolgen.

Im allgemeinen ist eine gewisse Mindestspannung nötig, damit überhaupt eine Fließbewegung eintritt. Sie wird im Englischen als „strength“ bezeichnet; ein entsprechender Ausdruck für diese wichtige Größe fehlt im Deutschen; die Begriffe „Fließfestigkeit“ und „Fließwiderstand“ sind am nächstliegenden, ohne daß sie sich jedoch mit dem englischen „strength“ völlig decken. In der Praxis hat man sich seither auf die Feststellung von wenigen Werten beschränkt. Außerdem haben die Messungen für ν kaum mehr als die Größenordnung ergeben. Man fand etwa für

Material	Viskositätskoeffizient ν gr/cm sec.
Steinsalz bei 20 ⁰	10 ¹⁷ — 10 ¹⁸
Isländ. Feldspat	6 · 10 ¹⁶
Blei	23/4 · 10 ¹⁶
Eis	10 ¹³
Asphalt bei 15 ⁰	10 ¹¹
Schuhmacherpech	10 ⁷
} Größenordnung	

Material	Druck	strength (Temperatur 20°)
Marmor	700 Atm.	$3 \cdot 10^9$ Dyn/cm ²
„	1700 „	$4 \cdot 10^9$ „
Steinsalz	600 „	$2\frac{1}{2} \cdot 10^9$ „
„	2500 „	$4 \cdot 10^9$ „
Quarz	1 „	$1 \cdot 10^9$ „

Mit zunehmendem allseitigem Druck (Manteldruck) nimmt der Viskositätskoeffizient stark zu, in kleinen Bereichen anscheinend etwa exponentiell, dagegen nimmt er bei zunehmender Temperatur noch wesentlich schneller ab, und in der Nähe der Schmelzgrenze der betreffenden Substanz wird zum mindesten bei kleinen Drucken fast der Wert 0 erreicht, sie hat dann außerdem keine „strength“ mehr, d. h. schon ganz kleine Spannungen bringen den Körper zum Fließen, er ist „weich“. Durch höhere Drucke wird auch in der Nähe des Schmelzpunktes die Viskosität erheblich erhöht (Näheres in Band 2), doch ist der Fließwiderstand in Gläsern anscheinend stets sehr klein.

Auf den *Vorgang beim Fließen* ist bereits S. 358 ff. eingegangen worden.

Wie schon erwähnt wurde, sind *Verwechslungen der Bedeutung der verschiedenen Größen* keine Seltenheit, insbesondere zwischen Righeit und Viskosität. Der Unterschied besteht in der Dauer der Deformation. Die Righeit definiert die vorübergehenden Formveränderungen, die Viskosität dauernde Deformation durch verhältnismäßig lange Zeit wirkende Spannungen. Aus Schuhmacherpech lassen sich Stimmgabeln herstellen, es setzt schnellen Formveränderungen einen meßbaren Widerstand entgegen, ist also ziemlich rig. Dagegen zerfließen diese Stimmgabeln im Laufe der Zeit unter ihrem eigenen Gewicht, das Pech hat einen sehr kleinen Viskositätskoeffizienten, ist also sehr weich und hat praktisch keine „strength“. Umgekehrt verhält sich Gummi.

Über den *Viskositätskoeffizienten im Erdinnern* wissen wir, wie unter den angegebenen Umständen zu erwarten ist, sehr wenig. Für die Erdkruste als Ganzes wurden Werte von der Größenordnung 10^{18} bis 10^{21} gefunden. Vielleicht gelten für die obersten Schichten etwas kleinere, für die tieferen etwas größere Werte. Nach W. SCHWEYDAR könnte ein Wert von 10^9 höchstens in einer 100 km dicken Schicht, ein solcher von 10^{13} bis 10^{14} höchstens in einer 600 km dicken Schicht angenommen werden, ohne daß sich Widersprüche mit den Beobachtungen der Gezeiten des Erdkörpers ergeben, während aus der Polbewegung folgt, daß für die ganze Erde der Zähigkeitskoeffizient über 10^{18} liegen muß. Aus Kombinationen verschiedener Beobachtungstatsachen kommt JEFFREYS auf die Größenordnung 10^{20} für den ganzen Erdmantel. Es widerspricht dies nicht der Annahme, daß in einer relativ geringen Tiefe die Grenze zwischen kristallinem und geschmolzenem Material liegt, denn anscheinend verringert sich der Unterschied zwischen der Viskosität sowohl wie der Righeit in der Schmelze und der betreffenden kristallisierten Substanz mit wachsendem Druck immer mehr. Dagegen bleibt nach JEFFREYS (a. a. O.) die „strength“ stets in der Schmelze und sogar noch in einem gewissen Bereiche oberhalb der Schmelztemperatur fast Null. Dies würde bedeuten, daß selbst bei hohen Drucken nicht nur eine Schmelze, sondern auch eine kristalline Substanz, deren Temperatur nur wenig über dem Schmelzpunkt liegt, schon unter der geringsten Spannung zu fließen anfängt, daß dagegen die Fließgeschwindigkeit unter hohen Drucken unter den genannten Umständen nicht wesentlich verschieden ist von der Fließgeschwindigkeit in einer kühlen kristallinen Masse der betreffenden Substanz. Übrigens brauchen auch die Geschwindigkeiten elastischer Wellen, die, wie erwähnt,

nichts mit der Viskosität zu tun haben, in beiden Fällen nicht sehr verschieden zu sein, zumal ein Teil der meist kleinen Unterschiede bei Righeit und Kompressibilität durch die Dichtedifferenz in beiden Zuständen kompensiert werden kann.

Wir können also damit rechnen, daß der Viskositätskoeffizient von etwa 10^{18} CGS an der Erdoberfläche zunächst mit zunehmender Temperatur und steigendem Druck etwas abnimmt, in der Nähe des Schmelzgebietes (60 bis 70 km Tiefe?) sein Minimum erreicht, dann unter der Zunahme des Druckes bei relativ geringer Temperaturänderung in der Schmelze wieder ansteigt und noch im Mantel den Wert 10^{20} CGS erreicht oder überschreitet. Analog nimmt ja auch der Righeitskoeffizient — abgesehen vielleicht von einer schwachen Abnahme in 60 bis 70 km Tiefe — im Mantel zu, wie wir oben sahen. Dagegen dürfte die „strength“ in den obersten 30 km der Erdkruste ihren größten Wert besitzen, dann erst langsamer, in größerer Tiefe schneller abnehmen und zwischen 50 und 60 km Tiefe praktisch den Wert Null erreichen. In diesen Tiefen würden also schon kleine Druckdifferenzen zu Fließbewegungen Anlaß geben und dauernd hydrostatisches Gleichgewicht — mit anderen Worten Isostasie — bewirken. In den oberen Schichten dagegen tritt Fließen erst nach Erreichen einer Mindestspannung ein, die Bruchgefahr ist infolgedessen dort erheblich größer (Erdbebenherde).

k) **Der Druck im Erdinnern.** Obwohl der Druck von der Dichteverteilung abhängt, ist die Unsicherheit der in Tabelle 55 angegebenen Werte relativ klein. (Näheres in Band 2.)

Tabelle 55
Druck im Erdinnern

Tiefe km	Druck in Atm.		Tiefe km	Druck in Millionen Atm.
	im Ozean	unter Kontinenten		
1	100	280	500	0,18
2	200	560	1000	0,38
5	500	1400	2000	0,86
10	1000	2800	3000	1,5
50	—	14500	4000	2,4
			5000	3,0
			6370	3,3

l) **Die Schichtung des Erdkörpers.** Die Erdbebenwellen zeigen uns, daß die Erde aus einem Kern mit einem Radius von 3500 km, einer Zwischenschicht mit einer Dicke von 1600 km und einem 1300 km dicken Mantel besteht. Wie wir oben sahen, ist die Dichte des Kernes etwa 10, d. h. die Annahme, daß er aus komprimiertem Nickeleisen (Atomen?) besteht, ist durchaus glaubhaft. Die Ansichten über die Beschaffenheit der Zwischenschicht gehen weiter auseinander. Wahrscheinlich handelt es sich um Sulfide und Oxyde, von denen erstere überwiegen. Der Mantel wird von Silikaten gebildet, die nach außen in basaltähnliches Material übergehen. Über den Aufbau der äußersten Schichten bestehen verschiedene Hypothesen, auf die — wie auf die meisten seither behandelten Fragen — in Band 2 des Handbuches näher eingegangen wird. Bezeichnen wir die oberste Schicht in den Kontinenten (vgl. S. 453), welche bis zehn und mehr Kilometer Tiefe reicht, mit a , die folgende bis rund 45 km Tiefe

mit *b*, die weitere, die auch im wesentlichen den Untergrund des Pazifischen Ozeans bildet, mit *c*, so erhalten wir folgende Zusammenstellung der wichtigsten Ansichten:

Schicht	R. A. DALY	JEFFREYS, ADAMS, WILLIAMSON, HOLMES
<i>a</i>	Granit mit α -Quarz	Granit
<i>b</i>	„ „ β - „	Basalt (Tachylit)
<i>c</i>	Plateaubasalt	Dunitartig

m) **Bewegungen in der Erdkruste.** Wir fanden bereits (S. 445 ff.), daß sich die Pole zurzeit relativ zur Erdoberfläche bewegen, und zwar durchschnittlich um etwa 15 cm im Jahr (abgesehen von periodischen Bewegungen), wobei die Frage noch offen ist, ob es sich um eine Verlagerung der Erdachse im Erdkörper oder eine mittlere Verschiebung der Erdkruste über den Erdkörper oder um beides handelt. Es taucht nun weiter die Frage auf, ob nicht Bewegungen der Kontinente gegeneinander feststellbar sind. Das Verdienst, diese Frage ins Rollen gebracht zu haben, gebührt A. WEGENER. Dieser gibt folgende Ergebnisse an¹⁾:

Breitenänderungen:

Paris	in 28 Jahren um	— 1,3''
Mailand	„ 60 „	— 1,5''
Rom	„ 56 „	— 0,2''
Neapel	„ 51 „	— 1,2''
Königsberg	„ 23 „	— 0,2''
Greenwich	„ 58 „	— 0,5''
Washington	„ 18 „	— 0,5''

In Indien wurden in längeren Zeiträumen Breitenänderungen zwischen — 1,56'' und + 0,90'' festgestellt²⁾, doch scheint es sich mindestens zum größten Teil um Beobachtungsfehler zu handeln.

Distanzänderungen (zusammengestellt nach A. WEGENER)

Nordostgrönland—Europa . . .	1823—1870	+ 9 m/Jahr
Nordostgrönland—Europa . . .	1870—1907	+ 32 „
Godthaabfjord—Europa . . .	1873—1922	+ 20 „
Godthaabfjord—Europa . . .	1922—1927	+ 36 „

Alle Beobachtungen sprechen also für Verschiebungen im gleichen Sinne. Aber auch innerhalb der Kontinente ergeben sich sowohl Horizontal- wie Vertikalverschiebungen, und zwar nicht nur aus geodätischen Messungen, sondern auch aus geologischen Betrachtungen. Dagegen konnte eine Verschiebung Amerikas gegen Europa während der letzten Jahrzehnte bisher nicht sicher festgestellt werden³⁾.

n) **Horizontalverschiebungen** (Vgl. auch S. 460 ff.). Die geodätischen Messungen ergaben in allen Ländern mehr oder minder große Veränderungen der Ergebnisse im Laufe der Zeit. Anfangs hielt man die Unterschiede für Beobachtungsfehler, die man nach der Methode der kleinsten Quadrate ausglich. Nach und nach fanden sich aber immer mehr Fälle, in denen die Unterschiede so groß waren, daß ein Meßfehler kaum noch in Frage kam. Erneute Messungen bestätigten fast immer, daß es sich um reelle Veränderungen handelt. Leider ist das Beobachtungsmaterial noch sehr dürftig, da ein erheblicher Teil der älteren Er-

¹⁾ Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 4. Aufl., Braunschweig 1929.

²⁾ Nature 125, 105, 1930.

³⁾ R. LIVLÄNDER, Zeitschr. für Geophysik, 6, 134, 1930.

gebnisse der oben erwähnten Methode zum Opfer gefallen ist. Andererseits sind die Unterschiede in vielen Fällen noch innerhalb der Grenzen der möglichen Fehler.

In Deutschland wurden vor allem von M. SCHMIDT¹⁾ Rechnungen über derartige Bewegungen in Bayern angestellt. Das Ergebnis, das in Figur 163 wiedergegeben ist, zeigte, daß das Gebiet unter der Voraussetzung, daß in München keine Bewegung vorhanden war, eine vorwiegend nach Westen gerichtete Bewegung von über 1 cm pro Jahr im Mittel ausgeführt hat.

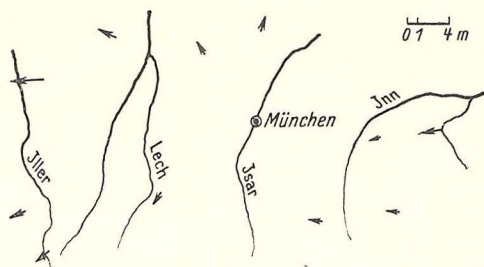


Fig. 163

Horizontalverschiebungen der Dreieckspunkte in Bayern zwischen der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts und dem Anfang des 20. Jahrhunderts nach M. SCHMIDT. Die rechts oben angegebene Strecke entspricht einer Verschiebung um 4 Meter im angegebenen Zeitraum

Wesentlich größere Werte wurden in Japan und in Kalifornien festgestellt. Die Bewegungen überschritten dort stellenweise 5 cm pro Jahr; nach Erdbeben wurden noch höhere Beträge beobachtet. Figur 164 zeigt Horizontalverschiebungen in Kalifornien nach W. BOWIE²⁾. Man erkennt deutlich, daß gewisse einheitliche Bewegungen in größeren Gebieten vorhanden sind.

o) **Vertikalverschiebungen** (vgl. auch S. 426 ff.). Die Verschiebungen von Strandlinien zeigen vielfach deutlich, daß in den letzten Jahrtausenden erhebliche Niveauänderungen stattgefunden haben. Am bekanntesten ist die Hebung Skandinaviens um bis zu fast 300 m in 1000 Jahren durch die Entlastung von Eis (vgl. S. 430). Aber auch in den letzten Jahrzehnten ergaben die geodätischen Nivellements, Untersuchungen über den mittleren Seestand (Fig. 165), sowie an Kunstbauten zweifelsfrei Niveauänderungen³⁾. In Figur 166 wurde der Versuch gemacht, diese für Europa zusammenzustellen. Dabei ist zweierlei

¹⁾ Neuberechnung des südlichen Netztes der Bayerischen Landestriangulierung... Sitzungsber. d. Bayer. Akad. S. 1, 1920. — Westwanderung von Hauptdreieckspunkten... Ebenda S. 297.

²⁾ Comparison of old and new triangulation in California. U. S. Coast and Geodetic Survey, Spec. Publ. Nr. 151, Washington 1928.

³⁾ Aus der benutzten Literatur: M. SCHMIDT, Untersuchung von Höhen- und Lagenänderungen... im bayerischen Alpenvorland, Sitzungsber. München S. 373, 1918. — Derselbe, Neuzeitliche Erdkrustenbewegungen in Frankreich, ebenda S. 1, 1922. — O. v. LINSTOW, Zeitschr. d. D. Geolog. Ges. 1917, S. 121 und 81, 67, 1929. — W. WOLFF, Forschungen und Fortschritte, S. 268, 1928. — A. BORN, Isostasie und Schweremessung, Berlin 1923. — J. L. WILSER, Heutige Bewegungen der Erdkruste, Stuttgart 1929. — H. SCHÜTTE, Krustenbewegungen an der deutschen Nordseeküste, Aus der Heimat 40, 325, 1927. — J. WEISSNER, Der Nachweis jüngster tektonischer Bodenbewegungen im Rheinland..., Haarfeld-Druck, 1929. — R. WITTING, Fennia 39, Nr. 5, Helsingfors 1918. — Derselbe, Geografiska Annaler S. 458, 1922.

zu beachten: Zunächst sind die Messungen zweifellos mit erheblichen Beobachtungsfehlern behaftet, dann ist meist vorausgesetzt, daß ein bestimmter, und zwar bei jeder Abhandlung ein anderer Punkt seine Höhe nicht geändert habe. Trotzdem ergaben sich bei der Zeichnung der Figur 166 keine größeren Widersprüche, so daß sie wohl ganz roh einen Anhaltspunkt für die Art der Änderungen gibt, deren Größe allerdings vielfach angezweifelt wird. Zweifellos überlagern sich verschiedene Vorgänge. Auch in Japan wurden wiederholt große Vertikalbewegungen auch außerhalb der Erdbebenzeiten festgestellt¹⁾ (vgl. auch S. 414).

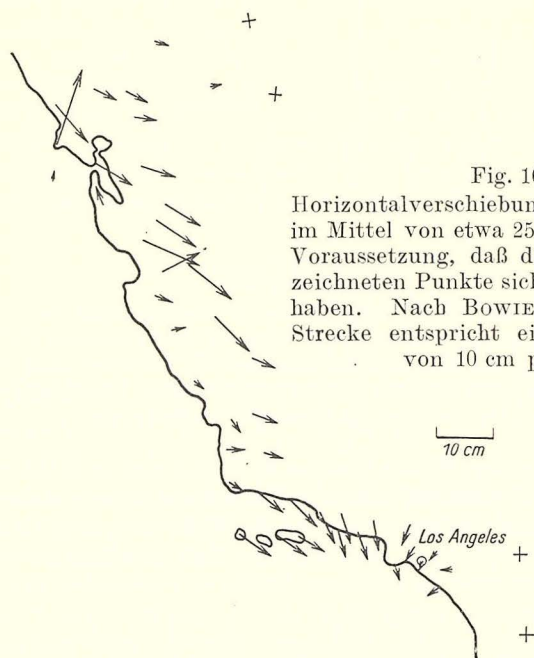


Fig. 164

Horizontalverschiebungen in Kalifornien im Mittel von etwa 25 Jahren unter der Voraussetzung, daß die vier mit + bezeichneten Punkte sich nicht verschoben haben. Nach BOWIE. Die angegebene Strecke entspricht einer Verschiebung von 10 cm pro Jahr

Im Bereiche der Ost- und Nordsee erfolgen die Bewegungen anscheinend ziemlich ruckweise, jedoch in größeren Gebieten gleichartig, so daß R. WITTING (a. a. O.) schloß, daß es sich um Bewegungen eines aus halbplastischen Schollen bestehenden, teilweise zusammengeschweißten Teiles der Erdkruste handelt.

Neben diesen epirogenetischen Bewegungen treten bei Erdbeben auch *plötzliche Bewegungen* auf, über die Tabelle 56 einige Anhaltspunkte liefert. *Schlüsse aus geologischen Ergebnissen* zog vor allem H. CLOOS²⁾. Wenn diese auch nicht die gleiche Sicherheit besitzen wie die geodätischen Messungen, so liefern sie doch in Verbindung mit diesen wertvolle Aufschlüsse über die Bewegungen in längeren Epochen. CLOOS fand etwa folgende Bewegungen:

Norwegisches Hochgebirge	relativ zu	Schweden	nach	S
Irland	„	Schottland u. England	„	S
Östl. Ver. Staaten	„	Westl. Ver. Staaten	„	N
Paz. Küste v. Kalifornien	„	Kalifornien	„	NNW
Vorderindien	„	Himalaya	„	N
Afrika	„	Europa	„	N

¹⁾ Verschiedene Abhandlungen im Bull. Earthquake Inst. Tokyo, Bd. 1ff.

²⁾ Bau und Bewegung der Gebirge. Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin 1928.

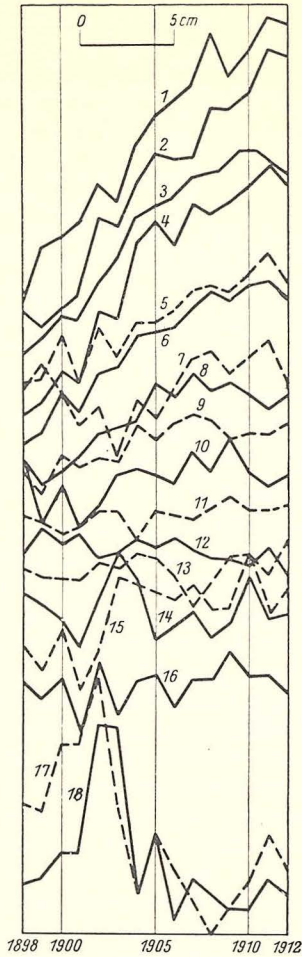


Fig. 165
Niveauänderungen 1898—1912
gegenüber dem Meeresspiegel
Nach R. WITTING¹⁾.

Ort	Breite	Länge
1. Toppila	65° 02'	25° 25'
2. Ratan	64 00	20 55
3. Räfsö	61 36	21 27
4. Draghällan	62 20	17 28
5. Jungfrusund	59 58	22 22
6. Lemström	60 07	20 02
7. Hogland	60 06	26 59
8. Västervik	57 46	16 39
9. Windau	57 24	21 34
10. Karlskrona	56 06	15 35
11. Swinemünde	53 55	14 16
12. Wismar	53 54	11 27
13. Fredrikshavn	57 26	10 34
14. Aberdeen	57 10	2 06
15. Dundee	56 27	2 58
16. Bremerhaven	53 32	8 34
17. Vlissingen	51 26	3 34
18. Helder	52 58	4 45

Der am oberen Rande angegebenen
Strecke entspricht eine Niveau-
änderung um 5 cm.

¹⁾ Auszug aus den viel umfang-
reicheren Kurven, Fennia 39, Nr. 5,
1918, Tafel 2.

Tabelle 56
Bodenbewegungen bei Erdbeben

Ort und Zeit des Bebens	Länge der Dislokation in km	Maximalverschiebung in m	
		horizontal	vertikal
Owens Valley, Kalifornien 1872	65	5	7
Sonora, Mexiko 1887	55	?	6
Japan (Mino-Owari) 1891	100	5	7
Indien (Assam) 1897	20	8	8
Alaska 1899	?	?	14
Kalifornien 1906	400	6	(1)
Formosa (Kagi) 1906	50	2 1/2	2
Messina 1908	?	?	1 1/2
Nevada 1915	40	?	5
Japan (Sagami) 1923 auf dem Lande . .	?	?	2
Japan (Tango) 1927	?	4	1
Japan (Sagami) 1923 auf dem Meeresboden angeblich (durch Rutschungen?) . . .	?	?	(200)

Eine systematische Untersuchung aller derartigen Bewegungen (auf geodätischer und geologischer Grundlage) verspricht wertvolle Ergebnisse.

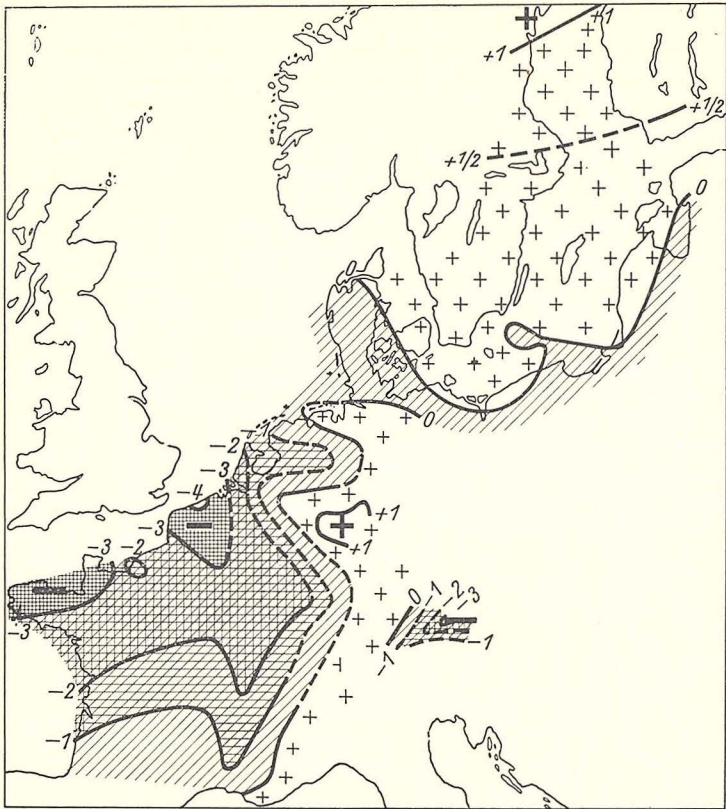


Fig. 166

Hebungen (+++++) und Senkungen (schraffiert) in Europa nach verschiedenen Untersuchungen. Die angegebenen Höhenänderungen wären nach den betr. Autoren cm pro Jahr, doch sind einerseits die Beträge noch unsicher, anderseits die Nullpunkte etwas verschieden, so daß die Figur die Vorgänge nur qualitativ wiedergibt

§ 248. Die Kräfte in der Erdkruste. Da wir das vorliegende Problem bereits im ersten Abschnitt eingehend behandelt haben, können wir uns hier auf eine Zusammenstellung der dort gefundenen Ergebnisse beschränken:

Ursache der Kraft	Richtung der Kraft (in den Kontinenten)	Maximale Größe oder Wirkung
Abkühlung der Erde	Verkleinerung des Erdradius	2 mm i. Jahrh.
Niveaudifferenz Kontinent-Ozean	äquatorwärts	10^7 Dyn/cm ²
Gezeitenreibung	westwärts	sehr klein
Präzession der Kontinente	westwärts	sehr klein
Polwanderungen	vertikal	mehrere km Niveauänderung
Polschwankungen	horizontal	10^3 Dyn/cm ²
Änderung der Rotationsgeschw.	horizontal	zurz. 0,001 cm/sec ²

Ursache der Kraft	Richtung der Kraft (in den Kontinenten)	Maximale Größe oder Wirkung
Abweichung der Erdoberfläche vom hydrostatischen Gleichgew.	horizontal (n. außen)	10^9 Dyn/cm ²
Luftdruckänderungen	Neigungsänderungen	0,01 "
Niveauänderung v. Schollen	horizontal	10^4 Dyn/cm ²
Temperaturschwankungen	vertikal	0,1 cm Niv.-Änd.
Gefrieren des Bodens	vertikal	1 cm Niv.-Änd.
Schwankungen des Seestandes	Neigungsänderungen	unter 1 "
Abschmelzen einer d km dicken Eisdecke	Hebung	$\frac{1}{3} d$
Sedimentation (Dicke d)	Senkung d. Unterlage	$\frac{1}{2} d$
Gezeiten des Erdkörpers	Vertikalbewegungen	30 cm

Hierzu kommen noch als besonders wichtige Kräfte, über die wir aber im allgemeinen nichts Genaueres aussagen können:

Chemische Vorgänge i. Erdinnern	horizontal u. vertikal	„Unterströmung.“
Kosmische Ursachen	verschieden	

§ 249. **Wirkungen von Kräften.** Das Problem, das bei der Untersuchung geotektonischer Hypothesen immer am stiefmütterlichsten behandelt wurde und daher auch zu den meisten Irrtümern Veranlassung gab, ist die Frage, welche Wirkungen Kräfte in der Erdkruste hervorbringen. Daß zwei verschiedene Möglichkeiten bestehen, allmählicher Ausgleich der Spannungen (Fließen) und plötzlicher Ausgleich (Bruch), wurde schon frühzeitig erkannt, ebenso die Tatsache, daß Brüche (Erdbeben) heute eine relativ geringe Rolle spielen und vermutlich ausschließlich in den obersten Schichten vorkommen (vgl. Band 4). In Gebieten mit sehr hohen Viskositätskoeffizienten bewirken selbst große Spannungen nur geringe Fließbewegungen; in Gebieten mit großer Fließfestigkeit (strength) müssen die Spannungen einen erheblichen Wert annehmen, damit überhaupt Fließbewegungen eintreten können. In solchen Gebieten werden sich also erhebliche Spannungen ausbilden können, schließlich wird die Grenze der Bruchfestigkeit erreicht, an einer Stelle reißt das Material, ein Bruch pflanzt sich von hier aus nach verschiedenen Seiten fort und erzeugt im Erdinnern Verwerfungen, die in manchen Fällen an der Erdoberfläche als Dislokationen erkennbar sind.

Die Hauptbewegungsvorgänge sind aber an Fließbewegungen geknüpft; insbesondere in den tieferen Schichten der Erde (über 30 bis 40 km nach unseren Ergebnissen S. 457), wo die Fließfestigkeit wesentlich geringer, vielleicht praktisch Null ist, spielen Fließbewegungen eine erhebliche Rolle. Ihre Untersuchung ist neuesten Datums, und zwar sowohl des Fließvorganges selbst¹⁾ wie seiner dynamischen Wirkungen, die uns hier an erster Stelle interessieren. Eine zusammenfassende Darstellung, die vor allem auch die Mängel der älteren Betrachtungsweise hervorhebt, rührt von J. GESZTI²⁾ her.

Für die *Fließvorgänge* gelten nach der Zusammenstellung von GESZTI folgende *Grundgesetze* (Fassung zum Teil anders als bei GESZTI):

¹⁾ F. RINNE, Gesteinskunde, 11. Aufl., Leipzig 1928 u. a. — A. NADAI, Der bildsame Zustand der Werkstoffe, Berlin 1927. — T. v. KARMAN, Festigkeitsversuche, Zeitschr. d. Ver. D. Ingen. 55, 1911. — H. CLOOS, Experimente zur inneren Tektonik, Centralbl. f. Mineralogie, B, Nr. 12, S. 609, 1928. — R. A. DALY, Our Mobile Earth, New York 1926. — Vgl. auch die Angaben S. 359.

²⁾ Zusammenschub der Erdrinde, Gerlands Beitr. z. Geophysik, 21, 36, 1929.

Für ein quadratisches Prisma mit der ursprünglichen Seitenlänge a und der Höhe h ergeben sich nach der Stauchung die Werte A bzw. H aus der Beziehung $a^2 h = A^2 H$ (Volumenkonstanz).

Nun ist nach dem vorangehenden

$$H = h + c \left(\frac{\rho}{\rho - \gamma} \right), \text{ also}$$

$$a = A \sqrt{1 + \frac{c}{h} \left(\frac{\rho}{\rho - \gamma} \right)} \dots \dots \dots (179)$$

Ist der Ausdruck unter dem Wurzelzeichen nicht allzuviel über 1, was in der Praxis wohl meist zutrifft, so gilt *angenähert*:

$$a = A \left(1 + \frac{c}{2h} \frac{\rho}{\rho - \gamma} \right) \dots \dots \dots (180 a)$$

$$D = a - A = \frac{c}{2h} \frac{\rho}{\rho - \gamma} A \dots \dots \dots (180 b)$$

Diese Beziehung (genauere Ergebnisse liefert 179) verbindet die Verkürzung D der Seitenlänge einer gepreßten quadratischen Scholle mit der Höhe h , um welche deren Oberfläche über das seitherige Niveau gehoben wurde. Setzen wir für die Dichten wieder die oben angegebenen Werte ein, für die ursprüngliche Schollentiefe $h = 45$ km, so wird $D = \frac{1}{3} c A$. Ist also etwa durch eine derartige Pressung ein Gebirge mit einer mittleren Höhe von $c = 1,8$ km entstanden, etwa der mittleren Höhe der Alpen entsprechend, so ist $D = 0,2 A$, die Seiten der Scholle haben sich bei der Pressung um rund 20 % der endgültigen Länge verkürzt.

Aus der Tatsache, daß sich ein relativ kleiner Teil der Scholle nach oben bewegt, der größere Teil nach unten fließt, folgt, daß eine Fläche, die bei unseren Zahlenannahmen in $\frac{1}{10}$ der Schollenhöhe unter der Oberfläche liegt, keine vertikale Bewegungen ausführt. GESZTI bezeichnet diese Fläche als „*Fließscheide*“; aus unseren Gleichungen folgt, daß ihre Lage nur von der Dichte der Scholle und der Dichte des Untergrundes (Sima) abhängt, nicht aber von den wirkenden Kräften, sofern die Isostasie gewahrt bleibt. Aus Gleichung (178) folgt noch, daß die Fließscheide dann auch mit dem Niveau des ungestörten Untergrundes zusammenfällt, in der Praxis also mit der Oberfläche von Sima, das weder von Wasser noch von Sial bedeckt ist. Wirkt die Pressung gleichzeitig auf den Untergrund und die Scholle, so gilt ganz Analoges. Man kann dann den Vorgang in zwei in Wirklichkeit gleichzeitig erfolgende Teilvorgänge zerlegen: eine Hebung des Untergrundes + Scholle und dann die Pressung der Scholle wie oben angegeben.

Diese Darlegungen setzten voraus, daß erstens dauernd Isostasie herrscht und zweitens die Fließgeschwindigkeit im Innern der ganzen Scholle konstant ist. Wir wollen nunmehr diese zweite Voraussetzung fallen lassen und an Hand der Darstellung von GESZTI prüfen, was dann eintritt. Am wesentlichsten ist die Tatsache, daß sich das *Gestein ganz verschiedenartig* verhält. Die oberflächennächsten Teile der Gesteinssäule besitzen die größte Fließfestigkeit und die niedrigste Elastizitätsgrenze; der mit der Tiefe wachsende allseitige Druck (Manteldruck) erhöht diese Werte weiter, die steigende Temperatur wirkt entgegengesetzt. In Figur 168 ist die Kurve der „*Formänderungsfestigkeit*“ für Sandstein und Marmor eingezeichnet. Die Kurven sind nach Einzelbeobachtungen gezeichnet, die v. KARMAN bei normaler Temperatur ausführte. Wir hätten danach bei kleinen allseitigen Drucken zunächst ein Gebiet, in dem relativ kleine Überdrucke zum Bruch führen, bei einem Druck von etwa 500 Atm (in

2 km Tiefe) würde das Fließen beginnen, in größeren Tiefen würde der hierzu nötige Druck wachsen; von etwa 3400 Atm Druck an (12 km Tiefe) wäre der zur Einleitungen von Fließbewegungen notwendige Überdruck bei Zimmertemperatur konstant 4000 bzw. 4500 Atm, also etwa $4 \cdot 10^9$ Dyn/cm². Da der Fließwiderstand mit zunehmender Temperatur abnimmt, können wir für die oberen Schichten der Erde etwa 10^9 Dyn/cm² annehmen; bei Annäherung an die Grenze zwischen kristallinem und amorphem Material nimmt dieser Wert zweifellos stärker ab.

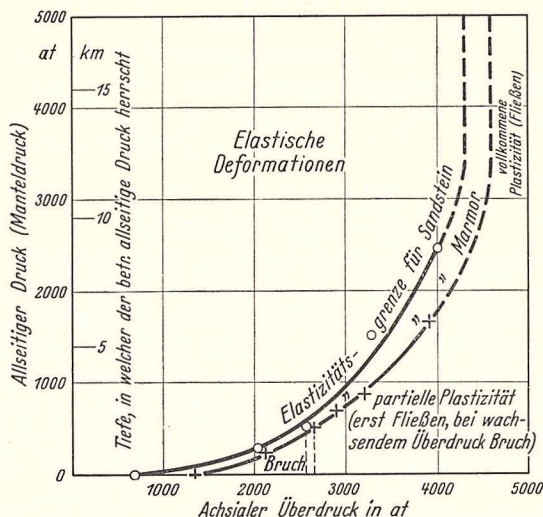


Fig. 168
Deformation
von Sandstein
und Marmor bei
verschiedenen
Drucken und
Zimmertem-
peratur nach
v. KARMAN

Aus den Ergebnissen von KARMAN hat GESZTI folgende Regeln abgeleitet:

1. An der Erdoberfläche führen relativ kleine Spannungen (gerichtete Drücke) zur Zertrümmerung.

2. Jede Erhöhung dieser Spannungen bringt eine tieferliegende Schicht zur Zertrümmerung (Bruch).

3. Gesteine besitzen eine eigene, durch ihre Formänderungsfestigkeit bedingte Tiefengrenze, bis zu welcher sie Bruch erleiden, wenn der gerichtete Druck immer weiter wächst. Diese Tiefengrenze ist von letzterem unabhängig, und beträgt nach den Untersuchungen v. KARMANS etwa 2 km, bei Marmor etwas mehr. Durch Feuchtigkeit in den Poren und durch die wachsende Temperatur verschiebt sich diese Grenze etwas nach oben. Andererseits können langanhaltende, schwächere Drücke, die bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt wurden, zu langsamen Fließbewegungen führen, wie sie ja in Bergwerken in der Tat beobachtet werden (Zuwachsen der Stollen).

Wie wirkt nun ein bis in größere Tiefen reichender, einseitiger Druck auf eine Fläche, die in vertikaler Richtung wesentliche Unterschiede der Formänderungsfestigkeit bzw. der Fließfestigkeit besitzt? Zur Erleichterung des Verständnisses für dieses Problem führt GESZTI folgendes Beispiel an: Ein Vollzylinder aus Stahl sei mit einem Hohlzylinder aus Bronze, dieser mit einem aus Kupfer umgeben, dem ein solcher aus Zink folgt. Sind p, q, r, s die Stauchungszahlen der Körper, d. h. die Verkürzung in cm, die ein Stab von 1 cm Länge und 1 cm² Querschnitt durch 1 kg erfährt, so ist bei Stauchung das Produkt Stauchungszahl mal einer Potenz n des Druckes (wo n in vielen Fällen gleich 1 ist) konstant. Sind also a, b, c, d die entsprechenden Drücke in unserem Falle, so ist

$$a^n p = b^n q = c^n r = d^n s \dots \dots \dots (181)$$

Ist $p < q < r < s$, so wird also $a > b > c > d$. Es bildet sich also bei der Stauchung (bzw. bei dem Fließvorgang) ein neuer Spannungszustand derart aus, daß bei dem am leichtesten fließenden Material, das die höchste Stauchungszahl hat, die niedrigste Spannung entsteht.

Was erfolgt nun aber, wenn in derartig inhomogenem Material Fließbewegungen nicht eintreten können? Für diesen Fall können wir auf Untersuchungen von SEZAWA und NISHIMURA¹⁾ zurückgreifen, die sich im wesentlichen mit diesem Problem befaßt haben, aber auch die Untersuchung des entsprechenden für viskose Körper begonnen haben, und deren Darstellung wir folgen wollen. In einem völlig elastischen Körper mit den von Ort zu Ort variablen LAMÉschen Konstanten μ und λ bestehen folgende Beziehungen zwischen den Volumenänderungen Θ und den Scherungen ω in Polarkoordinaten r, Φ bei zweidimensionaler Betrachtung:

$$(\lambda + 2 \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{2 \mu}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \Phi} - \frac{2 \mu \omega \cot \Phi}{r} = 0 \quad \dots \quad (182)$$

$$\frac{\lambda + 2 \mu}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial \Phi} + 2 \mu \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{2 \mu \omega}{r} = 0 \quad \dots \quad (183)$$

Die Lösung ist von der Form

$$\Theta = \left(A_n r^n + \frac{B_n}{r^{n+1}} \right) P_n (\cos \Phi) \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad \dots \quad (184)$$

$$2 \omega = \left(A'_n r^n + \frac{B'_n}{r^{n+1}} \right) \frac{d P_n (\cos \Phi)}{d \Phi} \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad \dots \quad (185)$$

Die Verschiebungen können getrennt für einen Teil a festgestellt werden, der rotationsfrei ist (n_1 bzw. v_1), für einen Teil b , der kompressionsfrei ist (n_2 bzw. v_2) und für einen Teil c , der weder Scherungen noch Volumenänderungen enthält (n_3 bzw. v_3). Es ist im

Falle a) $\omega = 0$

$$u_1 = \left[\frac{A_n (n + 2)}{2 (2 n + 3)} r^{n+1} + \frac{B_n (n - 1)}{2 (2 n - 1) r^n} \right] P_n (\cos \Phi) \quad \dots \quad (186)$$

$$v_1 = \left[\frac{A_n}{2 (2 n + 3)} r^{n+1} - \frac{B_n}{2 (2 n - 1) r^n} \right] \frac{d P_n (\cos \Phi)}{d \Phi} \quad \dots \quad (187)$$

mit $n = 0, 1, 2 \dots$ für A_n und $n = 1, 2, 3 \dots$ für B_n .

Fall b) $\Theta = 0$

$$u_2 = \left[\frac{A'_n (n + 1)}{2 (2 n + 3)} r^{n+1} - B'_n \frac{n (n + 1)}{2 (2 n - 1) r^n} \right] P_n (\cos \Phi) \quad \dots \quad (188)$$

$$v_2 = \left[\frac{A'_n (n + 2)}{2 (2 n + 3)} r^{n+1} + B'_n \frac{n - 2}{2 (2 n - 1) r^n} \right] \frac{d P_n (\cos \Phi)}{d \Phi} \quad \dots \quad (189)$$

mit $n = 1, 2, 3 \dots$. Dabei ist aber A_n mit A'_n bzw. B_n mit B'_n nach (184) bzw. (185) verbunden durch die Beziehungen

$$A'_n = - \frac{\lambda + 2 \mu}{\mu (n + 1)} A_n \quad B'_n = \frac{\lambda + 2 \mu}{\mu n} B_n \quad \dots \quad (190)$$

¹⁾ Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo, vol. 7, part 3, 389, 1929.

Schließlich ergibt sich im

Fall c) $\omega = 0$, $\Theta = 0$

$$u_3 = \left[A_n'' n r^{n-1} - \frac{B_n'' (n+1)}{r^{n+2}} \right] P_n(\cos \Phi) \dots \dots \dots (191)$$

$$v_3 = \left[A_n'' r^{n-1} + \frac{B_n''}{r^{n+2}} \right] \frac{d P_n(\cos \Phi)}{d \Phi} \dots \dots \dots (192)$$

mit $n = 0, 1, 2 \dots$

SEZAWA und NISHIMURA wandten diese Beziehungen nunmehr auf zwei spezielle Fälle an.

1. *Spannungen an einer Höhlung.* Ein völlig elastischer Körper, auf den ein Drehmoment oder ein Druck T ausgeübt wird, habe eine Höhlung mit dem Radius a . Wir bezeichnen die Hauptspannungen mit

$$\widehat{rr} = N \quad \widehat{r\Phi} = M \quad \widehat{\Phi\Phi} = O \quad \widehat{\Lambda\Lambda} = L \quad \widehat{\Lambda\Phi} = Q \quad \widehat{r\Lambda} = R.$$

Dann ist an der Begrenzung, falls der Koordinatenanfang in die Mitte der Höhlung gelegt wird, für $r = a$

$$N_{r=a} = 0 \quad M_{r=a} = 0; \dots \dots \dots (193)$$

ferner ist für $r = \infty$

$$N_\infty = T \cos^2 \Phi \quad O_\infty = T \sin^2 \Phi \dots \dots \dots (194)$$

und nach (186) bis (192) allgemein

$$N = T \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{a^3}{r^3} \right) + \left\{ \frac{2}{3} - \frac{10(9\lambda + 10\mu)a^3}{3\beta r^3} + \frac{24\alpha a^5}{\beta r^5} \right\} P_2(\cos \Phi) \right] \dots (195)$$

$$O = T \left[\left\{ \frac{2}{3} + \frac{(9\lambda + 34\mu)a^3}{6\beta r^3} + \frac{2\alpha a^5}{\beta r^5} \right\} - \left\{ \frac{2}{3} - \frac{10\mu a^3}{3\beta r^3} + \frac{14\alpha a^5}{\beta r^5} \right\} P_2(\cos \Phi) \right] \dots (196)$$

$$L = T \left[\left\{ \frac{(3\lambda - 2\mu)a^3}{2\beta r^3} - \frac{2\alpha a^5}{\beta r^5} \right\} + \left\{ \frac{10\mu a^3}{\beta r^3} - \frac{10\alpha a^5}{\beta r^5} \right\} P_2(\cos \Phi) \right] \dots \dots (197)$$

$$M = T \left[\frac{1}{3} + \frac{(15\lambda + 10\mu)a^3}{\beta r^3} - \frac{8\alpha a^5}{\beta r^5} \right] \frac{d P_2(\cos \Phi)}{d \Phi} \dots \dots \dots (198)$$

wo $\alpha = \lambda + \mu$ und $\beta = 9\lambda + 14\mu$.

An der Grenze der Höhlung im Punkte $r = 0$, $\Phi = \frac{\pi}{2}$ wird

$$O = \frac{39\lambda + 54\mu}{2(9\lambda + 14\mu)} T \dots \dots \dots (199)$$

speziell für $\lambda = \mu$ $\lambda = \infty$ (inkompressibler Körper)
 $O = 2,02 T$, $O = 2,17 T$

d. h. die Spannung ist an der Höhlenwandung etwa doppelt so groß wie die in einem homogenen Körper bei gleichmäßiger verteilter Spannung T .

2. *Spannungen an einer Einlagerung.* Nehmen wir nun statt einer Höhlung eine kugelförmige Einlagerung mit den LAMÉschen Konstanten λ' und μ' , so ergeben sich, falls alle Bezeichnungen wie im vorigen Falle benutzt werden, im Innern der Einlagerung ($r < a$):

$$N = T \left[G + 4\mu' \frac{D_1}{D} P_2(\cos \Phi) \right] \dots \dots \dots (200)$$

$$O = T \left[G + 2\mu' \frac{D_1}{D} - 4\mu' \frac{D_1}{D} P_2(\cos \Phi) \right] \dots \dots (201)$$

$$L = T \left[G + 2 \mu' \frac{D_1}{D} \right] \dots \dots \dots (202)$$

$$M = T \left[2 \mu' \frac{D_1}{D} \frac{d P_2 (\cos \Phi)}{d \Phi} \right] \dots \dots \dots (203)$$

und außerhalb der Einlagerung ($r > a$)

$$N = T \left[\frac{1}{3} + 2 H \frac{a^3}{r^3} + \left(\frac{2}{3} + \frac{9 \lambda + 10 \mu}{3} \frac{D_2}{D} \frac{a^3}{r^3} + 24 \mu \frac{D_3}{D} \frac{a^5}{r^5} \right) P_2 (\cos \Phi) \right] \quad (204)$$

$$O = T \left\{ \begin{aligned} & \frac{2}{3} - \left(H + \frac{\mu}{3} \frac{D_2}{D} \right) \frac{a^3}{r^3} + 2 \mu \frac{D_3}{D} \frac{a^5}{r^5} \\ & - \left(\frac{2}{3} + \frac{\mu}{3} \frac{D_2}{D} \frac{a^3}{r^3} + 14 \mu \frac{D_3}{D} \frac{a^5}{r^5} \right) P_2 (\cos \Phi) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (205)$$

$$L = T \left[\left(\frac{\mu}{3} \frac{D_2}{D} - H \right) \frac{a^3}{r^3} - 2 \mu \frac{D_3}{D} \frac{a^5}{r^5} - \left(\mu \frac{D_2}{D} \frac{a^3}{r^3} + 10 \mu \frac{D_3}{D} \frac{a^5}{r^5} \right) P_2 (\cos \Phi) \right] \quad (206)$$

$$M = T \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{3 \lambda + 2 \mu}{6} \frac{D_2}{D} \frac{a^3}{r^3} - 8 \mu \frac{D_3}{D} \frac{a^5}{r^5} \right) \frac{d P_2 (\cos \Phi)}{d \Phi} \right] \dots \dots \dots (207)$$

wo

$$G = \frac{(\lambda + 2 \mu) (3 \lambda' + 2 \mu')}{(3 \lambda + 2 \mu) (3 \lambda' + 2 \mu' + 4 \mu)} \dots \dots \dots (208)$$

$$H = \frac{2 \mu [3 (\lambda' - \lambda) + 2 (\mu' - \mu)]}{(3 \lambda + 2 \mu) (9 \lambda' + 6 \mu' + 12 \mu)} \dots \dots \dots (209)$$

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\lambda'}{7} & 4 \mu' & -c & -24 \mu \\ -a & 2 \mu' & d & 8 \mu \\ -\frac{\lambda'}{7 \mu'} & 2 & e & 3 \\ -b & 1 & \frac{1}{6} & -1 \end{vmatrix} \quad D_2 = \begin{vmatrix} \frac{\lambda'}{7} & 4 \mu' & \frac{2}{3} & -24 \mu \\ -a & 2 \mu' & \frac{1}{3} & 8 \mu \\ -\frac{\lambda'}{7 \mu'} & 2 & \frac{1}{3 \mu} & 3 \\ -b & 1 & \frac{1}{6 \mu} & -1 \end{vmatrix} \quad \left. \begin{aligned} D_1 &= \begin{vmatrix} \frac{\lambda'}{7} & \frac{2}{3} & -c & -24 \mu \\ -a & \frac{1}{3} & d & 8 \mu \\ -\frac{\lambda'}{7} & \frac{1}{3 \mu} & e & 3 \\ -b & \frac{1}{6 \mu} & \frac{1}{6} & -1 \end{vmatrix} \\ D_3 &= \begin{vmatrix} \frac{\lambda'}{7} & 4 \mu' & -c & \frac{2}{3} \\ -a & 2 \mu' & d & \frac{1}{3} \\ -\frac{\lambda'}{7 \mu'} & 2 & e & \frac{1}{3 \mu} \\ -b & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{6 \mu} \end{vmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (210)$$

$$a = \frac{8 \lambda' + 7 \mu'}{21} \quad b = \frac{5 \lambda' + 7 \mu'}{42 \mu'} \quad c = \frac{9 \lambda + 10 \mu}{3} \quad d = \frac{3 \lambda + 2 \mu}{6} \quad e = \frac{3 \lambda + 5 \mu}{6 \mu}.$$

Setzt man wieder $\lambda = \mu$ und $\lambda' = \mu'$, was in der Erde in ziemlicher Annäherung erfüllt ist, so erhält man für die Spannungen im Azimut $\Phi = \pi/2$ die in Figur 169 angegebenen Werte, wenn $\mu' : \mu = 1 : 2$, und die in Figur 170 angegebenen Werte, wenn $\mu' : \mu = 2 : 1$. Ist also die eingelagerte Kugel nachgiebiger gegen Formveränderungen (ohne daß ihre Elastizitätsgrenze erreicht ist) als die Umgebung, so steigt ohne Rücksicht auf den Kugelradius die Spannung außen über den Wert der Spannung im homogenen Körper an, erreicht an der Unstetigkeitsfläche ein Maximum und ist im Innern der nachgiebigeren Kugel

kleiner. Ist die Kugel umgekehrt starrer als ihre Umgebung, so ist die Spannung in ihrem Innern konstant und am höchsten, außen sinkt sie mit Annäherung an die Kugel. Es treten somit an einer Unstetigkeitsfläche, an der sich Richtigkeit und Kompressibilität merklich ändern, unter Umständen wesentliche Spannungserhöhungen auf. Solche Änderungen der elastischen Konstanten sind aber in der Erdkruste an Verwerfungen zweifellos oft vorhanden (vgl. S. 455 sowie Band 2).

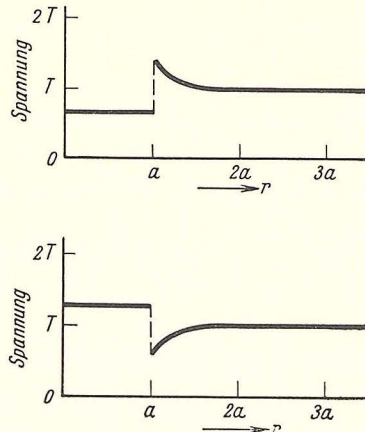


Fig. 169 (Oben)

Spannung in einem elastischen Körper, in den eine Kugel mit dem Radius a eingebettet ist, und auf den in der Richtung r eine gleichförmige Spannung T ausgeübt wird. Vorausgesetzt ist, daß in beiden Körpern die LAMÉschen Konstanten λ und μ je einander gleich sind, ferner daß sie außerhalb der Kugel den doppelten Wert haben wie innen, daß die Kugel also nachgiebiger ist. Der Nullpunkt liegt im Kugelmittelpunkt. Nach SEZAWA-NISHIMURA

Fig. 170 (Unten)

Das gleiche wie in Fig. 169, jedoch unter der Voraussetzung, daß die elastischen Konstanten in der Kugel doppelt so groß sind wie außen, daß die Kugel also weniger kompressibel und riger ist als ihre Umgebung

Wenn wir nun diese Ergebnisse auf die Erdkruste anwenden, so müssen wir die Wirkung des Temperaturanstieges in der Tiefe berücksichtigen. In größerer Tiefe, etwa von 50 bis 60 km Tiefe abwärts, ist das Material sehr fließfähig, sein Fließwiderstand ist gering, da seine Temperatur in der Nähe des Schmelzpunktes liegt. Darüber wächst mit abnehmender Entfernung von der Erdoberfläche der Fließwiderstand schnell an und erreicht in etwa 30 km Tiefe Werte, die wohl kaum viel unter dem Wert für die Oberfläche liegen. Dort werden sich also bei Auftreten von Kräften die Spannungen viel weniger leicht als in tieferen Schichten ausgleichen können. Es kommt hier zu größeren Spannungsdifferenzen und daher relativ leicht zum Bruch unter Erdbeben, die in der Tat in dieser Tiefe besonders oft ihren Ausgangspunkt haben. Die weniger widerstandsfähige Grenze zweier verschiedenartiger Schichten erleichtert den Bruch, anderseits müssen gerade an vertikalen oder horizontalen Schichtgrenzen nach Figur 169 und 170 besonders hohe Spannungen auftreten. In dem Augenblick, in dem Bruch erfolgt, sinkt die Spannung, diese überschreitet nunmehr in der darüberliegenden (dünnen) Zone die Bruchfestigkeit, der Bruch pflanzt sich so nach

oben, vielleicht auch etwas nach unten fort, da auch in der Tiefe die Spannung bei dem Beben plötzlich ansteigt. Dabei wächst die Spannung immer wieder an Unstetigkeitsflächen stark an. Im übrigen folgt aus Figur 168, daß in Tiefen über etwa 12 km dauernde Drucke nur Fließen, aber keinen Bruch bewirken können, *sofern es sich um homogenes Material* handelt. Die Entstehung von Erdbeben setzt also entweder plötzliche Drucke oder Existenz von Schichtgrenzen voraus. An Verwerfungen bilden sich nach der Theorie in Übereinstimmung mit den Beobachtungen sekundäre Herde aus.

Überschreiten die Spannungen nirgends die Bruchgrenze, so tritt *langsame Fließen* ein mit Ausmaßen, die erst in langen Epochen merklich werden. Damit dies Fließen zustande kommen kann, muß die Fließfestigkeit in allen Schichten, insbesondere in der Fließscheide, überschritten werden. Die „Formänderungsfestigkeit“ spielt hierbei keine Rolle, dagegen die Viskosität. Dann setzt der Verformungsvorgang ein, und bei Stauchungen bilden sich nach oben Aufwölbungen, nach unten viel größere Wülste, wie wir S. 464 gesehen haben, analog bei Dehnungen oben, vor allem aber unten in dem gleichen Verhältnis wie bei Stauchungen Einsenkungen. Die Einzelheiten dieser Vorgänge hängen von den Kräften ab, ihre Behandlung muß daher in den speziellen Kapiteln über die einzelnen Hypothesen erfolgen.

Ganz analoges gilt, wenn die Kräfte nicht, wie seither angenommen, allseitig gegen ein Prisma wirken, sondern nur gegen zwei gegenüberliegende Seiten, wie etwa bei den Polfluchtkräften. Wir erhalten dann ein Problem in der Ebene. Sind a und h die Dicke bzw. Höhe der gepreßten Platte vor, A bzw. H nach der Pressung, so wird jetzt $ah = AH$ und es wird analog (180a)

$$a = A \left(1 + \frac{c}{h} \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma} \right) \dots \dots \dots (211a)$$

und analog (180b)

$$D = a - A = \frac{c}{h} \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma} \dots \dots \dots (212b)$$

die Verringerung der Dicke der Platte bei der Stauchung.

Eine wichtige Frage lautet nunmehr: Wie groß ist die Höhenänderung bzw. Stauchung, wenn eine bestimmte Kraft p seitlich auf das ganze Prisma bzw. senkrecht gegen eine lange Platte wirkt? Am unteren Fuße der Platte herrscht Gleichgewicht mit dem alten Zustand, dort ist also überhaupt kein Gegendruck. Dieser wächst mit der Höhe, bleibt also im Mittel unter dem Druck, den die Aufwölbung auf ihre Unterlage ausübt. Eine Beziehung läßt sich aber nicht angeben, da nicht nur die durch Massenverlagerung statisch bedingten Kräfte in Frage kommen, sondern auch Reibungskräfte. Im übrigen darf man nicht übersehen, daß wir eine ganze Reihe von speziellen Voraussetzungen gemacht haben. Vor allem haben wir den Vorgang so dargestellt, als ob das Prisma oder die Platte von einer absolut starren und ebenen Nachbarsubstanz begrenzt sei, die selbst keinerlei Stauchungen erleidet. An der Bildung der Ausbuchtungen nach oben und unten ändert das zwar nicht viel, wohl aber bei der Anwendung unserer Ergebnisse auf die Gebirgsbildung. Im letzteren Falle muß man auch die weitere Voraussetzung fallen lassen, daß die gepreßte Substanz eine einheitliche Dichte hat. Die Untersuchungen haben vielmehr ergeben, daß im allgemeinen die mittlere Dichte eines Gebirges um so kleiner ist, je größer seine Höhe ist. Wenn man Gebirgsbildung durch Stauchung erklären will, stößt man hier auf Schwierigkeiten. Wir werden hierauf im nächsten Paragraphen nochmals zurückkommen. Die hier abgeleiteten Ergebnisse liefern jedenfalls wichtige statische Forderungen, wenn man die Dichte der verschiedenen Gesteinsplatten kennt und berücksichtigt.

Es liegt nun nahe, die Wirkungen von Kräften experimentell zu untersuchen. Derartige Experimente sind in der Tat angestellt worden¹⁾; sie betreffen jedoch in erster Linie spezielle Probleme und geben über die hier von uns angeschnittenen Fragen wenig Aufschluß (vgl. auch S. 415 ff).

Ein weiteres Problem ist bei der Frage nach der Wirkung der Kräfte noch von wesentlicher Bedeutung: Bei der Berechnung der Größe der Kräfte hatten wir mehrfach mit der Möglichkeit gerechnet, daß sich die *Kräfte über größere Gebiete bis zu der halben Erdoberfläche summieren*. Ist dies möglich? Die gleiche Frage tritt uns bei der Untersuchung der Schrumpfung der Erde entgegen: Kann die durch die Abkühlung der Erde bewirkte Verkleinerung der Erdoberfläche sich durch Gebirgsbildung auf einer schmalen Zone, etwa längs eines Großkreises, ausgleichen? Können sich diese Kräfte und Drucke über die halbe Erde übertragen?

H. JEFFREYS²⁾ hat sich mit diesem Problem näher befaßt. Er wies darauf hin, daß die Erde nicht etwa mit einem Prisma verglichen werden dürfe, das an den Stirnflächen gepreßt wird, daß vielmehr die Schwere eine wesentliche Rolle spielt. Er betrachtete das Problem zweidimensional und in einer Ebene (Vernachlässigung der Erdkrümmung). Sei x die Horizontalentfernung in einem langen Prisma, das horizontal liegt und eine zweidimensionale Biegung in einer Vertikalebene erleidet, y die als klein vorausgesetzte Vertikalverschiebung, so ist die Länge gegeben durch

$$\int \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \dots \dots \dots (212)$$

Infolge der Spannung verbiegt sich die Achse des Prismas. Die Endpunkte nähern sich dann um den Betrag

$$\frac{1}{2} \int \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx \dots \dots \dots (213)$$

Durch Multiplikation dieses Wertes mit der Kraft Q erhält man die Arbeit A

$$A = \frac{Q}{2} \int \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx \dots \dots \dots (214)$$

Die elastische Energie beim Biegen³⁾ ist $\frac{1}{24} E d^3 \left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)^2$ pro Längeneinheit, wo E der YOUNGSche Modul der Kruste und d deren Dicke ist. Die Kraft, welche das Übergewicht einer um y gehobenen Flächeneinheit trägt, ist $\rho g y$, die gravitative Energie somit $\frac{1}{2} \rho g y^2$ pro Flächeneinheit. Damit Stabilität herrscht, muß also folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\int \left[\frac{1}{2} Q \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 - \frac{1}{24} E d^3 \left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)^2 - \frac{1}{2} \rho g y^2 \right] dx < 0 \dots \dots (215)$$

¹⁾ Aus der Literatur: LEITH, Structural Geology, New York 1923. — H. CLOOS, Experimente zur inneren Tektonik, Zentralbl. f. Mineralogie, B, Nr. 12, S. 609, 1928. — Ders., Künstliche Gebirge, Natur und Museum, Heft 5, S. 225, 1929. — T. TERADA and N. MIYABE, Experimental Investigation on the Mechanismus of Formation of Step-faults . . . — Dies., Experiments on the Modes of Deformation of a granular Mass. . . Bull. Earthquake Res. Inst. 4, 33 bzw. 21, 1928. — Dies., Ebenda 6, 109, 1929. — Vgl. ferner F. RINNE, Gesteinskunde, 11. Aufl., Leipzig 1928. — R. A. DALY, Our Mobile Earth, New York 1926, u. a.

²⁾ The Earth, 2nd edition, S. 287, Cambridge 1929.

³⁾ Nach LAMB, Statics 1921, S. 313.

Die Länge der in der Säule erzeugten Wellen (Berge) sei $2\pi : \bar{n}$, und die Länge des Prismas sei groß gegenüber dieser Wellenlänge, dann lautet diese Bedingung

$$Q n^2 < \frac{1}{12} E d^3 n^4 + g \rho, \dots \dots \dots (216)$$

die im allgemeinen für die in Frage kommenden Wellenlängen erfüllt ist, wenn

$$Q^2 < \frac{1}{3} E d^3 g \rho \dots \dots \dots (217)$$

Der größte Druck, den Granit aushält, beträgt etwa 10^9 Dyn/cm², folglich ist Q höchstens gleich $10^9 d$. E ist von der Größenordnung $8 \cdot 10^{11}$ Dyn/cm² und ρ etwa gleich 3. Die Schichtdicke d muß also über 12 Meter betragen, damit Stabilität herrscht, eine Bedingung, welche in unserem Falle stets erfüllt ist¹⁾.

Es folgt also, daß *Spannungen über beliebige Entfernungen in der Kruste übertragen werden können* und daß Stabilität herrscht, solange die Fließgrenze der Gesteine nicht überschritten wird.

§ 250. Die Bedeutung der Geosynklinalen. Wie S. 383 ff. und in Band 2 des Handbuchs eingehender dargelegt wird, besteht die Erdkruste aus einer Reihe verschiedener Elemente, von denen der größte Teil eine gewisse Stabilität während der geologischen Epochen zeigte. Eine Ausnahme machen nur die Geosynklinalen, relativ schmale, langgestreckte Zonen der Erdoberfläche, welche zeitweise Meeresboden bildeten, in anderen Epochen wieder über dem Meeresspiegel lagen. Diese Geosynklinalen spielen offenbar bei der Gebirgsbildung eine wesentliche Rolle. Leider sind gerade bei den Geosynklinalen und noch mehr in bezug auf die Vorgänge, bei denen sie beteiligt sind, unsere Kenntnisse sehr mangelhaft. Wir wissen, daß die Geosynklinalen besonders starke Sedimentschichten enthalten, und können auch aus deren Lagerung schließen, daß die Geosynklinalen während ihrer Sedimentationsperiode relativ besonders labil waren, daß sie schon damals vielfach vertikale Bewegungen ausgeführt haben, bis sie schließlich aufgefaltet wurden und ihre Beweglichkeit verloren. Schon hieraus geht hervor, daß es sich dabei nicht nur um einen mechanischen Vorgang handeln kann, sondern daß dabei auch physikalische Änderungen in der Substanz vor sich gehen, die ihrerseits vermutlich wieder von chemischen Vorgängen herrühren.

Daß dies der Fall sein muß, zeigt die schon erwähnte Tatsache, daß nach den Untersuchungen von WASHINGTON (vgl. S. 453) über die Dichte der verschiedenen Teile der Erdkruste die Aufbaumaterialien im allgemeinen um so größeres spezifisches Gewicht haben, je tiefer das Krustenniveau liegt. Da auch die aus Geosynklinalen aufgefalteten Teile der Erdkruste hiervon keine Ausnahme machen, ist mit großer Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, daß diese bei der Auffaltung Veränderungen erlitten haben, die mit Änderung des spezifischen Gewichtes verbunden waren. Mit der Sedimentation in der ersten Epoche der Geosynklinale sind ebenfalls Bewegungen verknüpft, mit denen wir uns bei der Betrachtung der betreffenden Hypothesen befassen müssen. Diese sind aber viel zu gering, um ohne weitere Vorgänge ein Aufsteigen bis zur Höhe von Gebirgen auf den Kontinenten zu ermöglichen. Auch auf dieses Problem, das hier nur allgemein angedeutet werden sollte, werden wir noch zurückkommen müssen.

¹⁾ Eine strengere Untersuchung dieses Problems rührt her von S. GOLDSTEIN, Proc. Cambridge Philos. Soc. 23, 120, 1926.

Wir gehen nunmehr zur Betrachtung der verschiedenen Gruppen von Hypothesen über. Dabei ist es allerdings weder möglich, eine strenge Einteilung zugrunde zu legen, da die meisten Hypothesen mehreren Gruppen gleichzeitig angehören, noch ist es beabsichtigt, eine Darstellung aller Hypothesen zu geben, vielmehr sollen ausgehend von den Kräften die zu erwartenden Erscheinungen erörtert und charakteristische Beispiele für die betreffende Gruppe von Hypothesen gegeben werden.

Kapitel 20

Kosmische Vorgänge als Grundlage für geotektonische Hypothesen

§ 251. Die Planetesimalhypothese. Das Ziel der Wissenschaft ist, eine möglichst kleine Zahl von Grundtatsachen aufzusuchen, aus denen sich eine möglichst große Zahl von beobachteten Ergebnissen nach bestimmten Methoden widerspruchsfrei ableiten läßt. In unserem Falle müßte also eine Theorie den Vorzug verdienen, welche auf Grund von möglichst wenig Voraussetzungen die Entstehung und die Entwicklung der Erde abzuleiten gestattet. Eine solche will die von CHAMBERLIN¹⁾ 1904 aufgestellte Planetesimalhypothese sein. Hier-nach hat ein Himmelskörper, der sich in der Nähe der Sonne bewegte, bewirkt, daß von dieser kleine Körper, die „Planetesimalen“, ausgeschleudert wurden, welche kreisförmige Bewegungen um die Sonne ausführten. Diese Körperchen kristallisierten, vereinigten sich und bildeten so die Ausgangskörper für die Planeten, insbesondere auch für die Erde, und zwar waren hierbei anfangs in erster Linie die Metallkörperchen beteiligt; die Einzelheiten dieses Vorganges interessieren uns an dieser Stelle nicht. Die Erdachse lag damals in der Ebene der Ekliptik. Die Erdmasse wuchs zunächst nur langsam, dabei war die Vorder-seite (in der Bewegungsrichtung) bevorzugt, es bildeten sich zwei verschieden gebaute Halbkugeln heraus, der Schwerpunkt mußte sich im Laufe der Zeit entsprechend dem ungleichen Wachstum verlagern. Dieser Vorgang soll die Ursache für die ungleichmäßige Form der Erde sein, die eine vorwiegend mit Kontinenten bedeckte Halbkugel und eine fast reine Wasserhalbkugel besitzt. Im Laufe der Zeit wanderte dann die Erdachse in ihre heutige Lage.

In dem Maße, wie der Erdkern wuchs, war die Masse in der Lage, auch leichte Einheiten an sich zu fesseln. Es bildete sich nach und nach eine Atmosphäre, die zunächst nur aus schweren Gasen bestand (CO_2 , O_2 , N_2), erst später kam auch Wasser hinzu. Hiermit begann die zweite Epoche, in der ein Teil der in die Atmosphäre eindringenden Planetesimalen in Staubform in der Atmosphäre blieb, während der Rest auf die Erdoberfläche fiel. Alle Staubteilchen gelangten schließlich auf den Boden, bewirkten eine stärkere Zunahme der Masse, jedoch mit geringerer Dichte. So entstanden die Anlagen für die Schichtung der Erde. Gleichzeitig trat die Atmosphäre in Wechselwirkung mit der Struktur der Erdoberfläche und bewirkte eine Veränderung der Morphologie mit dem Endergebnis, das wir heute kennen. CHAMBERLIN hat ver-

¹⁾ Year-book Nr. 3, Carnegie Institution of Washington; vgl. ferner z. B. Scientia, 12, Sept./Okt. 1927; Carnegie Inst. Year-Book 1905 ff. Näheres in Bd. 1 des Handbuchs.

sucht, diese Entwicklung im einzelnen zu verfolgen; man darf jedoch nicht übersehen, daß die ganze Theorie auf zu schwachen Füßen steht, als daß man derartige Einzelheiten aus ihr ableiten kann. Bedenken gegen sie hat z. B. JEFFREYS¹⁾ geäußert, der den Nachweis versucht hat, daß jeder Planet bei seiner Entwicklung einmal flüssig gewesen sein muß. Es ist in der Tat der regelmäßige Aufbau der Erde kaum anders zu verstehen als unter der Annahme, daß eine gründliche Differentierung des ganzen Erdinnern und hierbei Bildung der gefundenen Schichtung stattgefunden hat. Man kommt bei der Planetesimaltheorie nicht um die Forderung herum, daß alle Planetesimalen im Erdinnern aufgeschmolzen wurden und dann erst einheitlich die Erde gebildet haben. Dann verliert aber die Theorie ihre Hauptvorteile und ist insbesondere keine „geotektonische Hypothese“ mehr. Im übrigen stützt sich dieser Teil der Theorie viel zu sehr auf das Endergebnis, während die Zwischenglieder, welche die Forschung gewonnen hat, fast völlig vernachlässigt werden.

§ 252. Die Hypothese der Ablösung des Mondes von der Erde. Im Jahre 1879 begann G. H. DARWIN²⁾ bei seinen grundlegenden Arbeiten über die Gezeiten zu untersuchen, was dann geschieht, wenn die gezeiterregende Kraft die gleiche Periode besitzt wie die freie Schwingung der Erde. In diesem Falle muß Resonanz auftreten, die Gezeiten werden immer höher, und DARWIN kam zu dem Ergebnis, daß dieser Fall möglicherweise im Laufe der Erdgeschichte einmal eingetreten sei, daß dabei die Flut, die damals nur durch die Sonne bewirkt wurde, so groß geworden sei, daß ein Teil der Erde sich losgelöst hätte und daß dieser Teil von da ab als Mond die Erde umkreise.

Über die Möglichkeit dieses Ereignisses ist viel veröffentlicht worden. Eine zweifelsfreie Lösung des Problems wurde bisher nicht gegeben. Auf der einen Seite fand z. B. MOULTON, daß die zur Loslösung notwendigen Vorbedingungen bei einer homogenen Erde nicht erfüllt seien, auf der anderen Seite kam JEFFREYS³⁾ zu dem Ergebnis, daß bei zweidimensionaler Behandlung des Problems und Einführung eines heterogenen Aufbaues der Erde, wie ihn die Untersuchungen ergeben haben, die Bedingungen für die Hypothese von DARWIN doch erfüllt sind. Er fand weiter, daß der Viskositätskoeffizient der Erde damals höchstens von der Größenordnung $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ gewesen sein kann, daß also die Erde eine Zähigkeit besessen haben mußte, die nicht größer war als etwa die von Schuhmacherwachs unter normalen Umständen. Seine Untersuchungen zeigen weiter, daß die tieferen Teile der Erde durch diesen Vorgang nicht berührt wurden, und daß der Mond dementsprechend nur Material aus den äußersten Teilen der Erde besitzen kann. Auch in der Zeit unmittelbar nach der Loslösung war das System Erde-Mond stabil; die Eigenbewegung des Mondes verhinderte, daß er auf die Erde zurückfiel.

Die Größenordnung der Zeit, welche seit der Loslösung des Mondes verflossen wäre, läßt sich angenähert berechnen, wenn man den Viskositätskoeffizienten der Erde als Funktion der Zeit kennt. Die Rechnung (Näheres in Band 2) ergibt unter Voraussetzung der auf verschiedene Weise gefundenen Werte des Viskositätskoeffizienten einen Zeitraum von mindestens 10^9 bis 10^{10} Jahren seit der Mondablösung. Dies ist nun aber andererseits auch etwa der Wert, den man für das Alter der Erdkruste findet (vgl. Band 2). Wenn

¹⁾ The Earth, 2nd edition, Kapitel 2 bzw. Appendix A, Cambridge 1929.

²⁾ Philos. Transact. of the Roy. Soc. London 170, Part II, 537, 1879, sowie folgende Bände bis 1882. Vgl. auch H. JEFFREYS, The Earth, S. 39—47, 1929.

³⁾ The Earth, 2nd edition, Cambridge 1929.

also die DARWINsche Theorie richtig ist, so würde die Mondablösung eine solche Katastrophe für die Erdkruste bedeutet haben, daß wir heute den Eindruck haben, daß sich die Erdkruste überhaupt erst damals bildete. Was wir als Geschichte der festen Erdkruste bezeichnen, wäre nur die Geschichte der Erdkruste seit der Ablösung des Mondes. Da nach den erwähnten Ergebnissen von JEFFREYS die Loslösung durch Entfernung eines Teiles der obersten Decke der Erde stattfand, ist es sehr plausibel, daß auch in den Teilen der Erde, die nicht direkt von der Katastrophe betroffen wurden, Umwälzungen vor sich gingen, die jede Spur einer früheren Kristallisation vernichteten, so daß uns im günstigsten Falle nur Gesteine zu Gesicht kommen, die nach dieser Katastrophe kristallisierten. Andererseits muß nach dem oben Gesagten auch schon vorher die Erde noch ziemlich plastisch gewesen sein.

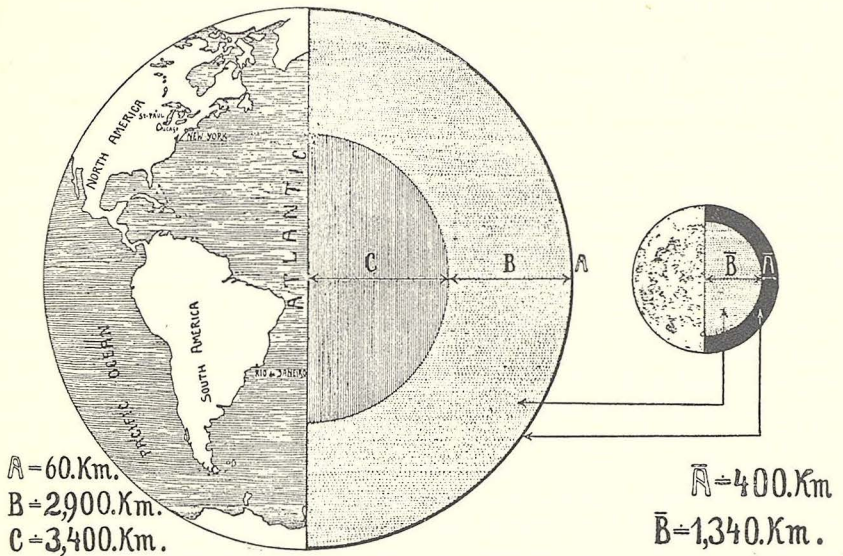


Fig. 171

Bildung des Mondes aus der Erde. Schwarz: Sial (A bzw. \bar{A}), punktiert: Sima (B bzw. \bar{B}), schraffiert: Erdkern (C). Nach S. MOHOROVIČIĆ

S. MOHOROVIČIĆ¹⁾ versuchte, auf Grund dieser Theorie den Aufbau des Mondes zu bestimmen. Danach würde der Mond hauptsächlich aus zwei Teilen bestehen, aus der oberen etwa 400 km dicken Schicht von einer mittleren Dichte von $2\frac{3}{4}$, welche der äußeren kontinentalen Schicht der Erde entstammt (vgl. Fig. 171) und aus dem Kerne mit einem Halbmesser von etwa 1400 km und einer mittleren Dichte von etwa 4,4. An der unteren Grenze der obersten Mondschicht würde etwa der gleiche Druck herrschen wie an der entsprechenden Grenze im Erdinnern. Es ergibt sich jedenfalls, daß auf Grund dieser Theorie die mittlere Dichte des Mondes mit 3,44 richtig herauskommt.

Eine viel umstrittene Frage ist die nach der Wirkung eines solchen Ereignisses auf den Aufbau der Erde. Wohl am wahrscheinlichsten ist die Vermutung, daß sich die Lücke durch Zuströmen von Substanz aus der Tiefe, an den Rändern auch von der Seite her geschlossen hat, wobei der Erdradius sich

¹⁾ Zeitschr. f. angew. Geophysik 1, 375, 1925.

verkürzte. Der erste, der diese Ansicht vertrat, war W. H. PICKERING¹⁾. Er nahm an, daß der Pazifische Ozean die Stelle sei, an welcher die Loslösung stattgefunden habe, und daß gleichzeitig durch die dabei in der Oberfläche entstehenden Spannungen die Trennung von Europa-Afrika von Amerika erfolgt sei. Gegen die PICKERINGSche Theorie wurden zahlreiche Einwände erhoben²⁾. In der Tat ist es mit den verschiedenartigsten Forschungsergebnissen unvereinbar (vgl. z. B. Fig. 157 S. 444), daß sich *schon zu jenen Zeiten* Amerika und Europa getrennt haben. Auf der andern Seite sprechen die seismischen Ergebnisse dafür, daß unter dem Atlantischen Ozean auch heute noch eine Verbindung dieser Kontinente aus kontinentalem Material besteht, dann ergeben die Auswertungen der Erdbebenaufzeichnungen (vgl. S. 453) aber auch, daß die Pazifikumrandung eine tiefgehende vertikale Schichtgrenze darstellt, und daß im Pazifikboden das kontinentale Material ganz oder mindestens fast ganz fehlt. Unter diesen Umständen gewinnt der erste Teil der PICKERINGSchen Theorie beträchtlich an Wahrscheinlichkeit. Es würde so die Ausgangsannahme einer ganzen Reihe von geotektonischen Hypothesen (u. a. von WEGENER, GUTENBERG, KOSSMAT, STAUB) erklärt, wonach ursprünglich, d. h. in diesem Falle nach der Mondablösung, die Kontinente einen zusammenhängenden Block bildeten. Die den Kontinentalblöcken entsprechende Schicht im Pazifikboden wäre nach der PICKERINGSchen Theorie vom Monde mitgenommen worden.

§ 253. Die Tetraederhypothese³⁾. Betrachtet man auf einem Globus die Lage der Gebirgszüge auf der Erde, so kann man nach Ansicht verschiedener Forscher die Umriss eines Tetraeders erkennen, von dem drei Ecken in die Landmassen der nördlichen Halbkugel fallen, während die vierte in der Antarktis liegen soll. Auf der andern Seite ist das Tetraeder derjenige regelmäßig gebaute Körper, der bei gegebenem Inhalt die größte Oberfläche hat. Die Anhänger der Tetraederhypothese sehen hierin einen kausalen Zusammenhang; sie nehmen an, daß die Oberfläche der Erde bei der Kontraktion ihre Größe beizubehalten suchte und daher Tetraederform annahm. Sie übersehen dabei aber, daß die Gravitationswirkung, welche die Ellipsoidform bewirkt, ganz erheblich viel größer ist, daß die Tetraederform der beobachteten Isostasie widerspricht, und daß jede Stütze für diese dem physikalischen Denken unverständliche Theorie fehlt. In noch höherem Maße gilt dies für die Annahmen, daß die Erde, sei es von vornherein, sei es im Laufe der Zeit, die Form anderer Kristallformen angenommen habe. Eine Hypothese, welche Abweichung der Erdform von der ellipsoidischen Gestalt verlangt, ist vom Standpunkt des Physikers nur dann diskutierbar, wenn ganz schwerwiegende Gründe dafür angeführt werden können. Aus diesem Grunde stießen sogar die Messungen, welche auf eine elliptische Form des Äquators schließen ließen, sofort auf schwere Bedenken und veranlaßten Untersuchungen (vgl. Band 1), ob hier nicht Fehler in den Rechenmethoden enthalten seien. Noch viel mehr gelten diese Bedenken für die Tetraeder- und andere ähnliche Hypothesen, so daß wir im folgenden von diesen absehen wollen, zumal die Argumente, die zu ihrer Aufstellung geführt haben, selbst auf sehr schwachen Füßen stehen.

Die Tetraederhypothese gehört natürlich nur insoweit in das vorliegende Kapitel, als die Entstehung der Form auf kosmische Ereignisse zurückgeführt

¹⁾ Journal of geology 15, 23, 1907; Geolog. Magaz. 61, 31, 1924.

²⁾ Vgl. z. B. H. EBERT, Gerlands Beitr. z. Geophysik 10, Kl. Mitt. S. 1, 1910.

³⁾ Vgl. z. B. K. ANDRÉE, Über die Bedingungen der Gebirgsbildung, S. 9, Berlin 1914; L. KOBER, Der Bau der Erde, S. 470, Berlin 1928.

wird. Andererseits wäre hier auf die Pendulationstheorie von SIMROTH (§ 279) zu verweisen, der die Entstehung von Polwanderungen teils durch Aufsturz von Himmelskörpern auf die Erde, teils durch von der Sonne ausgehende magnetische Kräfte zurückzuführen suchte. Wir werden hierauf bei der Frage nach den Polwanderungen zurückkommen.

Kapitel 21

Chemische Vorgänge in der Erdkruste als Ursachen für geotektonische Vorgänge

§ 254. Die Stoffwechseltheorie von V. M. GOLDSCHMIDT¹⁾. Zu den reizvollsten und ergebnisreichsten geotektonischen Theorien gehören die Ausdeutungen, die V. M. GOLDSCHMIDT seinen Untersuchungen über die Verteilung der Elemente in der Erde gegeben hat, und die ihrerseits wieder Ausgangsgrundlagen für weitere Untersuchungen bilden (vgl. Band 2 des Handbuchs).

GOLDSCHMIDT geht von der Möglichkeit aus, daß das Material der Erde ursprünglich eine angenähert homogene Mischung der chemischen Elemente bzw. deren Verbindungen darstellte. Heute dagegen ist die Verteilung der Stoffe inhomogen. Die Vorgänge, die hierzu geführt haben und noch jetzt zu den Wanderungen der Stoffe Anlaß geben, faßte GOLDSCHMIDT zu einem großen System des Stoffwechsels zusammen.

Zunächst mußte schon in der gasförmigen Erde durch das Schwerfeld eine Sonderung der Stoffe eintreten. Diese Wirkung wurde besonders groß, als die Erde bei zunehmender Abkühlung zu einem mehrphasischen System wurde, und führte zu dem aus der Erdbebenforschung bekannten Aufbau, den GOLDSCHMIDT aus petrographischen Gründen wie folgt deutete:

Tiefe km	Dichte	Bezeichnung	Substanz
0—120 ²⁾	2,8	Silikathülle	Silikate
120—1200	3,4—4	Eklogitschale	Komprimierte Silikate (Typus: Eklogit)
1200—2900	5—6	Sulfid-Oxyd-Schale	Sulfide und Oxyde, besonders des Eisens
2900—6370	etwa 8	Metallkern	Nickeleisen

Die Stadien, welche die Erde im Laufe der Zeit durchlief, lassen sich nach GOLDSCHMIDT folgendermaßen charakterisieren:

In dem ursprünglich gasförmigen oder schmelzflüssigen Erdball, über dessen chemischen Differenzierungsgrad wir noch keine sicheren Aussagen machen können, schieden sich unter dem Einfluß der Abkühlung drei Phasen, nämlich

¹⁾ Der Stoffwechsel der Erde, Vidensk. Skrifter Math.-Naturv. Kl., Kristiania 1922. — Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente 1ff., ebenda 1923ff. — Näheres in Bd. 2 des Handbuchs.

²⁾ Nach unseren Ergebnissen liegt diese Schichtgrenze in geringerer Tiefe. Auch in anderen Einzelheiten (Dichte) weichen unsere Ergebnisse etwas ab.

Metallschmelzfluß, Sulfidschmelzfluß und Silikatschmelzfluß. Diese drei Schmelzflüsse wurden unter dem Einfluß des Schwerfeldes konzentrisch angeordnet. Die Silikatschmelze ist noch von einer Dampfhülle umgeben. Bei dieser Trennung wurden diejenigen Metalle, die leichter reduzierbar sind als Eisen, oder besonders starke Affinität zum Schwefel besitzen, von vornherein vorzugsweise im Metallkern beziehungsweise in der ursprünglichen Sulfidschicht angereichert, so daß nur ein ganz kleiner Bruchteil dieser Metalle in der Silikatschale verblieb. Diese Verteilung von edlen und halbedlen Metallen zwischen Metallkern, Sulfid-Oxyd-Schale und Silikatmantel entspricht durchaus den metallurgischen Trennungsoperationen bei der Bildung von „Eisensau“, „Stein“ und „Schlacke“ im Hochofen.

Unter dem Einfluß fortschreitender Kristallisation schied sich die Silikathülle dann in leichtere und schwerere Anteile derart, daß schwere Sonderschmelzen und schwere Kristallarten absanken, leichte Sonderschmelzen, Gasphasen und leichte Kristallarten aufstiegen. In dem letzten Abschnitt der Entwicklung, der heute noch andauert, finden unter dem Einfluß von Gasen und Lösungen mannigfaltige Umlagerungen statt, die bereits verfestigtes Material der Silikathülle verarbeiten. Der geringe Gehalt der Erdkruste an Edelmetallen rührt nicht nur von der hierfür ungünstigen Primärverteilung zwischen Silikatschmelze, Sulfidschmelze und Metallschmelze her, sondern auch von den dann folgenden Vorgängen.

Eine Darstellung der Einzelheiten gehört teils in den Abschnitt Geochemie des Handbuches, teils in den Abschnitt über den Aufbau der Erde. Hier sei noch allgemein darauf hingewiesen, daß die Verteilungsquotienten keine unveränderlichen Größen sind, sondern von der Temperatur, dem Druck, und der Gegenwart fremder Stoffe abhängen, vor allem aber sehr mit der Konzentration wechseln können. Zum Schlusse seien nur noch nach GOLDSCHMIDT die Prinzipien etwas eingehender dargestellt, nach denen sich die Verteilung der Elemente in der Silikatschmelze regelt, wenn diese unter dem Einfluß allmählicher Abkühlung zur Kristallisation gebracht wird.

Zunächst werden die Kristallarten, deren Löslichkeitsgrenze bei der Abkühlung überschritten wird, ausgeschieden. Sind sie schwerer als die Restschmelze, so sinken sie in dieser unter, sind sie leichter, so werden sie oben bleiben. Auch flüssige Phasen können hierbei ausgeschieden werden. Insbesondere kann dies für Sulfidschmelzen eintreten, die dann absinken und zusammen mit schweren Erstkristallisationen der Sulfidschale zustreben. Andererseits dringen selbständige abgespaltene Gasphasen und wässrige Lösungen nach oben. Es würde zu weit führen, hier weitere Angaben über Einzelheiten zu machen. Wesentlich für die weiteren Hypothesen ist vor allem die Feststellung von GOLDSCHMIDT, daß die Elemente Thorium und Uran ganz vorzugsweise in den äußeren Schichten der Silikathülle angereichert sind, wohin sie gelöst in Gasen, wässrigen Lösungen und leichten Silikatschmelzen (besonders Granit und Syenit) durch Auftrieb gebracht wurden. Wärmeentwicklung durch Zerfall radioaktiver Substanzen müßte sich hiernach auf die obersten Schichten der Erdkruste beschränken.

Die endgültige Verteilung der Elemente führt zu vier Hauptgruppen:

Siderophile Elemente, angereichert in Nickeleisen (Erdkern),

Chalkophile Elemente, angereichert in Sulfidschmelzen (Zwischenschicht),

Lithophile Elemente, angereichert in Silikatschmelzen (Mantel),

Atmophile Elemente, angereichert in der Dampfhülle (Atmosphäre).

Die Stoffwechseltheorie von V. M. GOLDSCHMIDT gibt also nicht nur eine Deutung für den Aufbau der Erde, sondern auch Hinweise für die chemischen Vorgänge, welche in den geologischen Epochen in der Erdkruste stattgefunden

haben und auch heute noch andauern. Die Bedeutung der Geochemie für die Probleme der Geotektonik ist von den meisten Forschern, die sich mit diesen Problemen befaßt haben, völlig verkannt worden. Auf S. 463 wiesen wir ja schon darauf hin, daß bei den meisten geotektonischen Vorgängen chemische Umwandlungen zum mindesten als Begleiterscheinung eintreten müssen. Auf der anderen Seite glaubte allerdings eine Reihe von Forschern, die tektonischen Vorgänge ganz oder fast ausschließlich durch chemische Prozesse erklären zu können. Mit diesen Theorien wollen wir uns nunmehr befassen.

§ 255. Allgemeine plutonische Theorien. (Unterströmungstheorien von AMPFERER und ANDRÉE.) Eine ganze Reihe von Hypothesen geht davon aus, daß Vorgänge im Magma zu Volumvergrößerung führen, die ihrerseits wieder direkt oder indirekt die Ursache der Gebirgsbildung sei. Die klassische Theorie dieser Art ist die „Plutonische Erhebungstheorie“ von L. v. BUCH, ALEXANDER v. HUMBOLDT und anderen. Nach ihr haben Aufwölbungen des Magmas, in modernerer Ausdruckweise Lakkolithen, in erster Linie die Gebirge erzeugt.

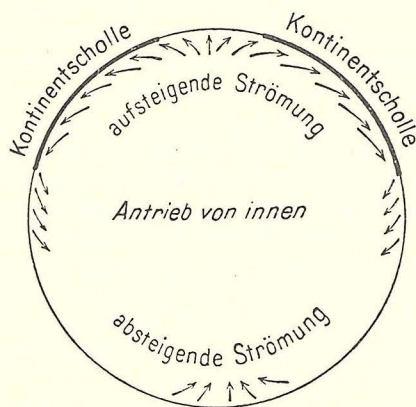


Fig. 172
Unterströmungen
nach AMPFERER.

Noch in neuerer Zeit sind derartige vulkanische Hebungskräfte mit zur Erklärung für die Gebirgsbildung herangezogen worden, so von W. DEEKE¹⁾ im Falle der Alpen. Verwandt mit dieser Theorie sind Ansichten, die ROTHPLETZ²⁾ geäußert hat; er sucht die Entstehung von Überschiebungen durch Hebungen von Teilen der Erdkruste zu erklären, die mit horizontalen Bewegungen, besonders an den Rändern, verknüpft sind.

Ebenfalls auf Bewegungsvorgänge im Erdinnern greift die „Unterströmungstheorie“ von AMPFERER zurück³⁾. Allerdings geht AMPFERER nicht auf die Ursache der Unterströmung ein, erst ANDRÉE, auf dessen Theorie wir anschließend zu sprechen kommen, führte sie auf Vorgänge im Magma (Kristallisation) zurück. AMPFERER nimmt an, daß durch irgendwelche Kräfte im Magma Strömungen entstehen (Fig. 172), welche die Kontinentalschollen mit sich führen. Diese Strömungen im Magma, die mit unseren Ansichten über die Fließfestigkeit in der Tiefe (Strength, vgl. S. 456) durchaus vereinbar sind, wären zugleich die Ursache für die immer weiter gehende Zerreißen der großen Kontinentmassen in kleinere Stücke und für die Auseinanderzerrung dieser Trümmer. Die Erscheinungen, die bei der hierdurch bewirkten Verschiebung der Kontinente auf-

¹⁾ Neues Jahrbuch für Mineralogie . . . , Beil.-Bd. 33, 850, 1912.

²⁾ Geotektonische Probleme, Stuttgart 1894.

³⁾ Die Naturwissenschaften 13, 669, 31. Juli 1925.

treten, werden wir bei der Betrachtung der Verschiebungstheorien behandeln. Das Wesentliche der AMPFERERSchen Theorie liegt in der Annahme von Strömungen, die durch Vorgänge im „Magma“ erzeugt werden.

Eine Erweiterung und Begründung dieser Theorie versuchte, wie erwähnt, K. ANDRÉE¹⁾. Dieser verwies vor allem auf die Ansicht von v. RICHTHOFEN²⁾, wonach die Erscheinungen des Vulkanismus darauf hinweisen sollen, daß mit der langsamen und vollkommenen Kristallisation zähflüssiger Silikate unter der festen Erdrinde eine Volumenvermehrung verbunden ist. G. TAMMANN³⁾ ist der Ansicht, daß alle Substanzen einen maximalen Schmelzpunkt besitzen. Wir hätten in diesem Falle in der Tat damit zu rechnen, daß tiefere Teile der Erde unter Ausdehnung kristallisieren und daß dabei Unterströmungen erzeugt werden. Allerdings dürfen wir nicht übersehen, daß die Größe des Druckes, dem der maximale Schmelzpunkt entspricht, falls dieser überhaupt existiert, einer wesentlich größeren Tiefe entsprechen dürfte als der, in welcher zurzeit die Grenze zwischen Schmelze und kristallisierter Erdkruste liegt⁴⁾. Andererseits weist ANDRÉE darauf hin, daß auch weitere Umwandlungen der Kristalle möglich sind. Wir können auch heute noch ANDRÉE zustimmen, wenn er schreibt:

„Fassen wir das Gesagte zusammen, so ergibt sich, daß die neueren Resultate chemischer und geophysikalischer Forschung durchaus die Möglichkeit geben, an Volumschwankungen (im einen oder anderen Sinne) in den Tiefen der Erde zu denken.“ ANDRÉE bringt nun diese Volumschwankungen einmal mit der Unterströmungstheorie zusammen, dann mit dem Problem der Geosynklinalen. Er nimmt an, daß die erwähnten Störungen des Gleichgewichtes vor allem in den Geosynklinalen auftreten, und daß dann die auf Isostasie hinzielenden Kräfte wirksam werden.

In der Tat sind ja in der Nähe der Umrandung des Pazifischen Ozeans, wie wir sahen, tiefreichende Unstetigkeiten, an denen diese Unterströmungen einen besonders geringen Widerstand finden. Diese Tatsache ist zweifellos von größerer Bedeutung als der Unterschied in den Rigideitskoeffizienten, den ANDRÉE für wesentlich erachtet, der aber kaum eine Rolle spielt, da elastische Formveränderungen hier nicht in Frage kommen. Eher sind die Viskositätskoeffizienten und die Fließfestigkeit von Bedeutung, über diese wissen wir jedoch nichts Genügendes, um theoretische Betrachtungen darauf aufzubauen. Ist nun durch die Wirkung der Volumenänderung auf die Geosynklinale das Gleichgewicht gestört, so ist es nach ANDRÉE „sehr naheliegend, der Isostasie die Bedeutung zuzuschreiben, daß sie den Gleit- und Unterströmungsvorgängen, für deren Entstehung nunmehr die Bedingungen, insbesondere das Schweregefälle, gegeben sind, die einseitige Richtung vorschreibt, die für die Falten unserer Kettengebirge mehr oder weniger bezeichnend ist. Ob diese nun gegen die kontinentale oder gegen die ozeanische Scholle gerichtet ist, wird dabei von der Richtung des neu erzeugten Schweregefälles abhängen, woraus vielleicht umgekehrt Schlüsse auf dieses gezogen werden können. Diese richtende Kraft der Isostasie ist schon von BAILEY WILLIS und dann von HAUG angenommen worden, allerdings unter Beibehaltung der Kontraktion als letzter Ursache.“

Ein weiteres Problem ist die *Wanderung der Faltung*, d. h. die Tatsache, daß die Gebirgsbildung zunächst in einer Zone beginnt, dann die Nachbarzone

¹⁾ Über die Bedingungen der Gebirgsbildung, Berlin 1914.

²⁾ Zeitschr. d. Deutsch. Geolog. Ges. **21**, 10, 1869.

³⁾ Kristallisieren und Schmelzen, Leipzig 1903; Aggregatzustände, Leipzig 1923.

⁴⁾ Vgl. hierzu die Untersuchungen von F. SIMON an Helium (Forschungen u. Fortschritte **5**, 298, 1929), dessen Folgerungen in bezug auf den Zustand der Erde allerdings den Ergebnissen der Seismophysik widersprechen. Vgl. auch ²⁾ S. 42.

ergreift und so von Zone zu Zone in einer bestimmten Richtung wandert, während die zuerst ergriffenen Zonen wieder zur Ruhe kommen. ANDRÉE sieht als Ursache hierfür das Fortschreiten einer Unterströmung oder irgendeiner der anderen Veränderungen der die Erdhaut unterlagernden Zonen.

Nicht nur die orogenetischen, sondern auch die epirogenetischen Bewegungen sind auf derartige Vorgänge zurückzuführen; im ersten Falle fehlen die Möglichkeit der Auslösung von Unterströmungen bzw. die durch die isostatischen Kräfte hervorgerufenen seitlichen Bewegungskomponenten.

Eine Erweiterung der Unterströmungstheorie bilden die *Zyklonentheorien* und die *Drifttheorien*, auf die wir später zurückkommen. Der wesentlichste Fortschritt der Unterströmungstheorie lag in dem Gedanken des fließenden Erdinnern. Der immer wieder gegen diese Theorien erhobene Einwand, daß das Erdinnere „starrer als Stahl sei“, trifft nicht die Theorie, da weder Kompressibilität noch Rigkeit bei diesen Problemen in Frage kommen, sondern die Viskosität und vor allem die Fließfestigkeit (strength). Diese ist aber in der Tiefe zweifellos kleiner als an der Oberfläche (vgl. Band 2).

Der Grundgedanke von ANDRÉE ist der, daß diese Bewegungen durch Vorgänge hervorgerufen werden, welche zu einer Vergrößerung des Volumens der Substanz im Erdinnern führen. Die daran geknüpften Folgerungen sind, wie erwähnt wurde, zum Teil durchaus denkbar. Andererseits treffen auch einige Einwände zu, die NÖLKE (a. a. O., S. 442) gemacht hat. Vor allem aber bleibt eine ganze Reihe von Tatsachen ungeklärt, und insbesondere ist die Größe der bei dem Vorgange auftretenden horizontalen Spannungen offenbar überschätzt worden. NÖLKE nimmt für den Tangentialdruck, unter dem eine Gesteinssäule in den obersten Schichten der Erde ausweicht, $7000 \text{ kg pro cm}^2 \text{ an}^1$). Daraus folgt, daß erst eine Aufwölbung von über 20 km die Faltung der obersten Erdschichten bewirken könne. Wir sehen jedenfalls, daß ein Teil der im vorliegenden Paragraphen besprochenen Ansichten eine gewisse Annäherung an die wirklichen Vorgänge darstellen können. Als solche wollte sie auch ANDRÉE bewertet haben.

In den Kreis der hier betrachteten Theorien gehört auch die *Differentiationshypothese* von MORDZIO²⁾, nach der sich die Gase in der Erdkruste leichter von den basischen als von den sauren Bestandteilen trennen. Dadurch entstehen wieder, ähnlich wie oben, jedoch auf andere Weise, Störungen der Isostasie, das leichtere Material muß nach oben abfließen, die Gebirge sind isostatisch gehobene, leichtere Massen. Dieses theoretische Ergebnis wurde dann, wie wir sahen, später durch die Beobachtungen bestätigt, doch sind auch hier von NÖLKE mehrere Einwände mit Recht erhoben worden, so fehlt eine Erklärung für die Faltenbildung, wie denn überhaupt diese Gruppe von Hypothesen wohl vertikale, nicht aber horizontale Bewegungen bzw. Kraftäußerungen zu erklären vermag.

§ 256. Die Zyklustheorie von E. KRAUS³⁾. Einen Schritt weiter auf dem zuletzt besprochenen Wege ging E. KRAUS. Auf der einen Seite vertritt er den Standpunkt, daß zur Erklärung der wichtigsten gebirgsbildenden Vorgänge als solcher nur aktive Strömungen des tiefliegenden Gesteinsbreies im Sinne von AMPFERER in Frage kommen, auf der anderen Seite wies er auf die von vielen

¹⁾ Vgl. hierzu S. 456; 7000 kg/cm^2 sind etwa $7 \cdot 10^9 \text{ Dyn/cm}^2$.

²⁾ Die Gebirgsbildung der Erde, Leipzig 1922.

³⁾ Geolog. Rundschau/9, 353 u. 481, 1928.

Autoren festgestellte Vergrößerung der Kontinente durch Angliederung neuer Gebirgsgürtel am Rande hin. Die Ursache für die Unterströmungen werden auch von KRAUS nur angedeutet: Chemische und physikalische Umsetzungen, Molekül-, Kristallisations- und Zustandsänderungen stehen dabei nach seiner Ansicht an erster Stelle. In etwa 40 bis 60 km Tiefe muß das bereits sehr mobile Gestein bei sehr geringen Änderungen von Druck oder Temperatur vom amorphen in den flüssigen Zustand oder umgekehrt übergehen und dabei sehr starke Volumenänderungen erzwingen, die ähnlich, wie im vorigen Paragraphen dargelegt wurde, unter Umständen Strömungen zum Ausgleich in Gang setzen. Dieses „chemisch-physikalisch-mineralogische Hauptlaboratorium“, die aktive Magmen- oder Fließzone, bezeichnet KRAUS als Stockwerk A (Fig. 173). In ihm

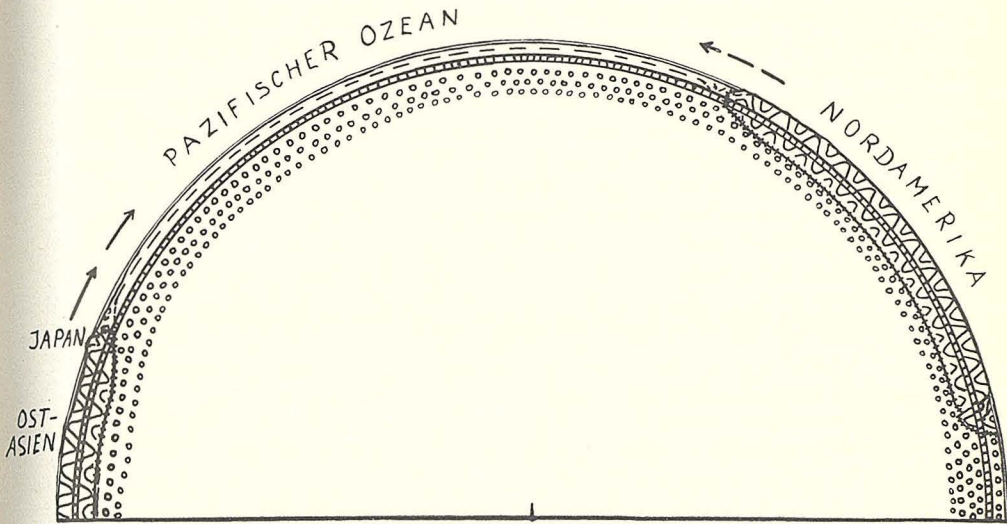


Fig. 173

Schematischer Querschnitt durch die pazifische Erdhälfte nach E. KRAUS. Erdrinde 5-fach überhöht. Ringe: Sial, Wellenlinien: Sal, Längsstriche: Sal/Sima ungetrennt (Stammagma), Querstriche zwischen zwei Linien: Fließzone A, Querstriche über einfacher Linie: Stockwerk B. Pfeile deuten die Wachstumsrichtung der Kontinente an

werden nun nach KRAUS Störungen hervorgerufen, etwa durch kosmische Einflüsse. Unter dem Stockwerk A liegt ein Grenzstockwerk B zwischen Sial und Sima, das infolge seiner stofflichen Inhomogenität ebenfalls sehr leicht auf Störungen reagiert. Auf ihm schwimmen die Sialkontinente. Während aber das Stockwerk A über die ganze Erde verläuft, taucht das Stockwerk B unter den Kontinentaltiefen hervor und streicht an den Rändern der großen Ozeane mehr oder weniger aus (vgl. Fig. 173).

Wir kommen nunmehr zu dem Mechanismus der Theorie. Die ersten Anzeichen für die Anlage einer Geosynklinale setzen in den Profilen im allgemeinen mit einer Sedimentation ein. Der betreffende Untergrund sinkt, gelangt in immer enger werdenden Raum, es entstehen faltige Ausweichbewegungen nach oben. Im folgenden Stadium verschnellert sich die Senkung und ergreift weitere Nachbarräume, es kommt zu einer „Orogenese in der Tiefe“, wo sich der Sialwulst faltet. Die isostatischen Ausgleichsbewegungen verstärken den Vorgang. „Immer weiter steigert sich hierbei exogen durch Verwitterung und endogen-plutonisch das Simagemisch, immer mehr wird das spezifisch leichtere Sialische dem sin-

kenden Sialwulst zugeführt und in ihn eingefaltet. Darin sehen wir einen grundlegenden Fortschritt auf dem Wege der Umbildung von Simatischem in Sialisches, d. h. von echt ozeanischem in echt kontinentales Material. Der durch wechselvollste Vorgänge geschaffene Sialwulst wird nun im nächsten Stadium dieser Entwicklungsreihe (Zyklus) dem Kontinent angegliedert.“

Betrachten wir nun das Verhalten des Magmas während dieser Vorgänge. Hierbei unterscheidet nun KRAUS im Gegensatz zu der üblichen Auffassung drei Arten: Das ursprüngliche „Salsima“, in dem tieforogenetische Vorgänge stattfinden, dann das sialische und das simatische Magma, die beide durch Differentiation aus jenem entstehen. Wird durch „geosynklinalen Tiefenzug am pazifischen Festlandrand salisch-simatisches Stammagma und in der Mulde exogen gesammeltes Sediment in das 40 bis 60 km-Stockwerk A der Fließzone hinabgezogen, so kommt es zu außerordentlichen Umwälzungen. Unter starken Volumenänderungen, daher Bewegungen und Eruptionen von Mischmagma bis an die (meist submarine) Oberfläche, differenziert sich der Glutfluß im tieforogenen Stadium. Das basische, simatische Differentiat versinkt im allgemeinen, das saure, salische versucht zu steigen. Immer neues Stammagma und Exogenmaterial rückt von oben nach und wird umgeschmolzen. Immer dicker wird der granitisch-gneisische Sialwulst, bis er schließlich die ganzen obersten 60 km erfüllt und dadurch ein zunehmendes Steigvermögen erworben hat“. Aus den Beobachtungsstatsachen folgert KRAUS noch, daß der Ozeanboden, welcher an Küsten mit pazifischem Typus angrenzt, in den obersten Teilen aus Salsima besteht.

Umgekehrt müssen dann der Pazifik und die alte Thetys als Primitivozeane angesehen werden, die von Salsima bedeckt sind, unterlagert von schon in den ältesten Zeiten vermutlich mehr regional gesaigten Massen. Der Indische und der Atlantische Ozean besitzen dagegen differenzierte Böden.

Nach und nach erlahmt die Tiefenkraft; als Schlußergebnis finden wir, daß der Kontinent um einen Gebirgswulst gewachsen ist. Die Orogenese erbaut also die Kontinente, die Zyklustheorie führt zu dem Ergebnis, daß diese dauernd wachsen. Das Geburtsdatum der salischen, konsolidierten Kontinentalschollen fällt in die archaische Zeit. Der ganze Vorgang ist nicht umkehrbar; was wir beobachten, ist nicht — nach SUESS — der Zusammenbruch des Erdballs, sondern dessen fortschreitende Entwicklung. Die Kraft, welche diese bewirkt, geht in der Hauptsache auf aktiv-magmatische Tiefenströmungen zurück, deren Ursache KRAUS in der stofflichen Verschiedenheit der krustalen Gesteine vor allem in vertikaler Richtung und in kosmischen, druckändernden Einflüssen sieht.

Auch für die Hypothese von KRAUS gilt das schon bei der vorigen Gesagte: Sie enthält eine ganze Reihe von Gedanken, deren Richtigkeit nicht bezweifelt werden kann, daneben aber unzutreffende Voraussetzungen, z. B. die Annahme, daß die Grenze zwischen Sial und Sima bzw. das Salsima unter der Fließgrenze liegt, und ähnliche Mängel wie die ANDRÉESche Hypothese, also insbesondere anscheinend nicht genügende Erklärung für die horizontalen Bewegungen.

§ 257. Die Radioaktivitätstheorie von JOLY¹⁾. Der Hypothese von JOLY liegen zwei Tatsachen zugrunde; zunächst die Feststellung, daß im Laufe der geologischen Epochen immer wieder Zeiten der Epirogenese mit Orogenesen (Revolutionen der Erdgeschichte) abgewechselt haben, dann die Tatsache, daß in der Erdkruste beim Zerfall radioaktiver Substanzen Wärme entwickelt wird.

¹⁾ The Surface-History of the Earth, Oxford 1925.

Während wir in § 2 S. 4 ff versucht hatten, diese Wärme aus der geothermischen Tiefenstufe zu berechnen, geht JOLY von der bekannten Wärmeentwicklung der Gesteine an der Erdoberfläche aus, macht plausible Annahmen über die Schichtung der Erdkruste und sucht die Wärmeentwicklung zu berechnen, welche von diesen Schichten herrührt.

Von Wichtigkeit hierfür ist zunächst die Tatsache, daß nach Untersuchungen im Laboratorium die Wärmeentwicklung radiumhaltiger Substanzen bisher weder durch Drucke bis zu 2000 Atmosphären noch durch Erhitzung auf 1500° beeinflußt werden konnte.

JOLY ging davon aus, daß die radioaktiven Substanzen, die in 1 g Granit enthalten sind, etwa $w = 3 \cdot 10^{-13}$ Kalorien pro Sekunde erzeugen. Setzt man die Dicke d der radioaktiven Schicht zu 31 km, ihre mittlere Dichte $\rho = 2,7$ und nimmt man weiter innerhalb der Schollen überall die gleiche Wärmeentwicklung an, so werden in einer Säule von dem Querschnitt 1 cm² $w d \rho = 2,5 \cdot 10^{-6}$ cal/sec frei. Setzt man andererseits den Temperaturgradienten zu 3,5°/100 m und die Wärmeleitfähigkeit $k = 0,007$ (vgl. S. 7), so ergibt sich, daß durch 1 cm² der Erdoberfläche ein Wärmestrom von $3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,007 = 2,5$ cal/sec fließen muß, d. h. es strömt gerade so viel Wärme durch die Erdoberfläche, wie in der 31 km dicken Schicht erzeugt wird. Aber auch unter diesen Schichten wird Wärme entwickelt, die zunächst latent bleibt, dann aber die darüberliegenden Schichten aufschmilzt. Die bei diesen Betrachtungen von JOLY benutzten Zahlenwerte stimmen zum Teil nicht mit dem, was wir als wahrscheinlich ansehen müssen, z. B. die Voraussetzung, daß die Grenze zwischen kristallinem und amorphem Gestein in 30 bis 40 km Tiefe liegt; hierdurch werden aber nur die von JOLY gefundenen Zahlenwerte, nicht die Ergebnisse als solche betroffen.

Da nach JOLY die kristalline Schicht unter den Ozeanen dicker und zum Teil kälter ist als unter den Kontinenten, sinken letztere beim Schmelzen der Unterseiten der Schollen zuerst ein und werden vom Meere überflutet. Im Unterbau der Kontinente entstehen Gezeiten, daneben sucht die Volumvergrößerung der geschmolzenen Massen die ganze Kruste zu heben. In einer weiteren Veröffentlichung¹⁾ gab JOLY unter Hinweis auf H. H. POLE und J. H. J. POOLE²⁾ eine genauere Darstellung dieser Vorgänge nach seiner Ansicht. Die beiden letzteren hatten darauf hingewiesen, daß es für die Beurteilung des ganzen Problems wichtig sei, zu wissen, ob die adiabatische Erwärmung der in die Tiefe sinkenden Schmelze schneller oder langsamer vor sich geht, als die Zunahme der Schmelztemperatur mit der Tiefe erfolgt, und versuchten zu zeigen, daß nach unseren Kenntnissen die Zunahme der Schmelztemperatur mindestens in den obersten 200 km stärker ist als die adiabatische Temperaturerhöhung. Wenn also Magma durch die Überproduktion von Wärme beim Zerfall radioaktiver Substanzen schmilzt, so sinkt es ab, erwärmt sich dabei adiabatisch, bleibt aber immer kälter als seine neue Umgebung. Die Oberflächenschicht wird dabei immer dünner, die Wärmeabfuhr nach außen immer stärker, und schließlich stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein.

Nach JOLY ist inzwischen auch der kristalline Ozeanboden dünner geworden, auf der ganzen Erde und insbesondere unter den Ozeanen bilden sich Brüche, durch die das geschmolzene Magma ausbricht, dann seine Wärme in den Welt-raum ausstrahlt und dabei wieder kristallisiert (kontinentale Basaltmassen und pazifische Inseln). Der erste Vorgang des Aufschmelzens soll unter Voraus-

¹⁾ Gerlands Beitr. z. Geophysik 19, 415, 1928.

²⁾ Philos. Magaz. (7) 5, 662, Nr. 29, 1928.

setzung der Zahlenwerte von JOLY etwa 40 Millionen Jahre dauern, für die zweite Epoche sind abermals viele Millionen von Jahren anzusetzen. Dabei bewirken die Gezeiten im geschmolzenen Magma und die Westdrift erzeugenden Kräfte (vgl. S. 23) Verschiebungen ganzer Kontinente, deren Untergrund nunmehr unter Ozeane kommt. Durch all diese Vorgänge hat sich nach und nach ein Zustand herausgebildet, bei dem mehr Wärme abgegeben als erzeugt wird, es tritt wieder Kristallisation ein, und schließlich bildet sich ein dem Anfangszustand ähnlicher Aufbau der Erdkruste heraus, worauf eine Zeit der Ruhe folgt, in der sich ein neuer Zyklus der gleichen Art, wie oben beschrieben, vorbereitet.

Mit diesen Überlegungen suchte JOLY nicht nur die Annahme einer nur dünnen, radiumhaltigen Oberflächenschicht, die wir auf Grund der geothermischen Tiefenstufe annehmen mußten (S. 7), zu umgehen, sondern auch die „Revolutionen in der Weltgeschichte“ zu deuten. Er gelangte zu folgender Gegenüberstellung:

Unteres Kambrium	Kontinentale Periode
Kambrium	Untertauchen der Kontinente
Unteres Silur	Auftauchen und Gebirgsbildung
Oberes Silur	Kontinentale Periode
Devon	Untertauchen der Kontinente
Oberes Karbon und Perm	Auftauchen und Gebirgsbildung
Trias	Kontinentale Periode
Jura	Untertauchen der Kontinente
Kreide	Maximum der Transgression (Überflutungen)
Tertiär und Quartär	Auftauchen und Gebirgsbildung.

J. H. J. POOLE¹⁾ suchte die Vorgänge in dem Falle, daß die radioaktiven Substanzen sich bis in größere Tiefe erstrecken, theoretisch zu ergründen. Er stellte sich folgendes Problem: Gegeben eine lange vertikale Säule eines kristallinen Körpers, der eine bestimmte Menge radioaktives Material enthält. Gesucht die Geschichte des Systems unter verschiedenen Randbedingungen, die den Verhältnissen im Erdkörper so weit als möglich gleichen. Entsprechend der Theorie von JOLY wird weiter angenommen, daß die Länge der Säule so groß ist, das heißt im Falle der Erde, daß die radioaktive Schicht so dick ist, daß unten an der Säule der Schmelzpunkt überschritten wird und die Säule zu schmelzen beginnt. POOLE findet nun unter den angegebenen Voraussetzungen, daß zunächst die obere Grenze des geschmolzenen Teiles sich schneller nach oben (der Erdoberfläche zu) verlagert als die untere Grenze, das geschmolzene Stück vergrößert sich. Sobald aber die Tiefe erreicht ist, in der die Änderung der Schmelztemperatur mit der Tiefe gleich der geothermischen Tiefenstufe wird, verlangsamt sich das Aufschmelzen nach oben, die geschmolzene Schicht wird immer dünner und schließlich ist die ganze Säule wieder fest. Die oben erwähnte Schmelzpunktgeotherme verlagert sich in der folgenden Zeit in die Tiefe, und nach einer Epoche der äußeren Ruhe beginnt der ganze Vorgang von neuem. Bei jedem folgenden Zyklus liegt jedoch das Ende in geringerer Tiefe. Die Übereinstimmung mit Beobachtungen ist nicht befriedigend. POOLE schiebt dies den theoretischen Voraussetzungen zu. Die Zyklusdauer ergibt sich zu etwa 16 Millionen Jahren, das Ende des Schmelzvorganges erfolgt beim ersten Zyklus in 8 km Tiefe, bei den folgenden noch wesentlich näher der Erdoberfläche.

¹⁾ Proc. Dublin Soc. (N. S.) 19, 385, 1930, Nr. 32.

An die Hypothese von JOLY hat sich eine umfangreiche Diskussion angeschlossen¹⁾. Auf der einen Seite sucht sie einen Ausweg aus der Schwierigkeit, daß man nur eine relativ dünne Schicht mit Entwicklung von Wärme durch radioaktive Substanzen annehmen kann, wenn man nicht derartige katastrophale Wärmeabfuhr annehmen will, wie es JOLY tut; auf der anderen Seite häuft sie eine wesentlich größere Zahl von Schwierigkeiten. Zunächst ist sie mit der beobachteten geothermischen Tiefenstufe völlig unvereinbar. Wenn die im Erdinnern erzeugte Wärme wirklich so groß wäre, wie es JOLY annimmt, müßte die Temperatur in der Erdkruste viel schneller ansteigen, im Mittel rund 10^0 pro 100 m (vgl. S. 8). Aber auch große Teile der Theorie geben zu schweren Bedenken Anlaß (vgl. die erwähnte Literatur). Es ist insbesondere nicht einzusehen, warum sich nicht bald unter schneller Abnahme der Amplituden der „Revolutionen“ ein Gleichgewichtszustand herausbildet. Andererseits ist es schwer erklärbar, wie es überhaupt zur Bildung einer dickeren Kruste unter solch starker Wärmeentwicklung durch radioaktive Substanzen gekommen ist.

Die Kernpunkte der ganzen Frage hat sehr klar G. KIRSCH²⁾ formuliert. Vom physikalischen Standpunkte aus ist nach dem heutigen Stande der Wissenschaft nur mit einer dünnen Schicht zu rechnen, in der Wärme durch Zerfall radioaktiver Stoffe produziert wird; die Erde kühlt sich ab. Nach den Ansichten der meisten Geologen (insbesondere von KIRSCH selbst) sind im Erdinnern wesentlich größere Wärmequellen vorhanden, so daß mehr Wärme erzeugt als nach außen abgegeben wird, die Erde erwärmt sich. Wenn man annimmt, daß der Erdmantel bis 1400 km Tiefe nur $0,02 \cdot 10^{-12}$ g Radium pro cm^3 enthält und entsprechend Thorium und Kalium (das wäre weniger als in den meisten Eisenmeteoriten gefunden wurde), so wäre ihre Wärmeproduktion etwa die gleiche wie die einer 15 km dicken Granitschicht. Es ergibt sich hieraus, daß die Annahme einer Abkühlung der Erde gleichbedeutend mit der Annahme ist, daß die Radioaktivität von nicht ganz 100 km Tiefe ab höchstens ein Tausendstel des Wertes an der Erdoberfläche beträgt. KIRSCH hält dies für sehr unwahrscheinlich, und er verweist darauf, daß allein der Kaliumgehalt der Erde nach WASHINGTON ein Vielfaches der im Falle der Abkühlung statthafter Wärmezeugung liefert, und daß selbst bei Annahme des *niedrigsten* in der Literatur bekannten Wertes für den Gehalt der Erde an Kalium (nach CLARKE 0,04 %) schon durch das Kalium allein so viel Wärme erzeugt würde, wie aus der Erde auströmt. KIRSCH gab dann noch eine Reihe von weiteren Argumenten für die Zyklen- und gegen die Abkühlungstheorie an, doch sind diese zum Teil unzutreffend (Annahme eines viel zu kleinen Viskositätskoeffizienten für das Erdinnere), vor allem aber kann auch KIRSCH keinen Grund für die Tatsache angeben, daß der Wärmefluß aus dem Erdinnern tatsächlich so gering ist, daß er einer so großen Wärmezeugung, wie sie JOLY, KIRSCH und andere annehmen, widerspricht.

Die Versuche von JOLY und anderen, die Deutung der Zyklen in der Erdgeschichte auf diese Weise zu geben, müssen also als nicht geglückt angesehen werden. Es bleibt nun noch die Beantwortung der Frage, wie die Abnahme der radioaktiv erzeugten Wärme in relativ geringen Tiefen zu deuten ist. Ver-

¹⁾ U. a.: H. JEFFREYS, Philos. Magaz. (7) 1, 923, 1926. — J. JOLY, ebenda 1, 932, 1926; 4, 338, 1927; 5, 215, 1928. — H. JEFFREYS, The Earth, 2nd Ed., S. 323, Cambridge 1929. — F. LOTZE, Göttinger Nachr. S. 75, 1927. — Ders., Gerlands Beitr. z. Geophysik 20, 77, 1928. — J. JOLY, ebenda 20, 288, 1928. — A. HOLMES, Geological Magaz. 64, 263, 1927.

²⁾ Geologie und Radioaktivität, Wien 1928 (mit ausführlichen Literaturangaben).

mutlich handelt es sich in erster Linie um Ursachen bei der Bildung der radioaktiven Substanzen (vgl. S. 479). Zum Teil spielt vielleicht Wärmeabgabe durch Vulkane, heiße Quellen oder heiße Gase, besonders in Zeiten größerer Regsamkeit der Erde mit (vgl. LOTZE a. a. O.), vielleicht sind einige Zahlenwerte, die wir zur Berechnung benutzten (S. 7 ff; insbesondere die Wärmeleitfähigkeit in der Tiefe!) unrichtig angenommen, vielleicht ist die Wärmeproduktion unter den in der Tiefe herrschenden Bedingungen doch wesentlich anders: Alle diese Möglichkeiten geben leichter eine Deutung für unser Problem als die Theorie von JOLY, der insofern eine große Bedeutung zukommt, als sie der Forschung einen mächtigen Impuls gegeben hat.

§ 258. **Weitere Unterströmungstheorien.** Außer den genannten Forschern hat eine beträchtliche Zahl unter verschiedenen Voraussetzungen geotektonische Hypothesen oder Anregungen zu solchen veröffentlicht, welche als wesentlichen Punkt chemische Vorgänge im Erdinnern enthalten, die mehr oder minder auf dem Wege über Strömungen im Untergrund die Erdgeschichte beeinflussen. Ihre eingehende Behandlung würde an dieser Stelle zu weit führen, so daß wir uns nur noch auf einige Hinweise beschränken wollen. Insbesondere wiesen A. HOLMES¹⁾, dessen Untersuchungen wir schon bei der Erörterung der Theorie von JOLY (S. 487) erwähnten, auf die Bedeutung der chemischen Vorgänge im Erdinnern hin. Auf der anderen Seite kam H. CLOOS²⁾ für die Vorgänge an der Erdkruste zu Ergebnissen, die denen entsprechen, welche AMPFERER für die Tiefe annimmt.

Die Tatsache, daß viele Gebirge der Erde Formen zeigen, welche dem Bilde einer meteorologischen Zyklone ähnlich sehen (Fig. 174), haben mehrfach³⁾ zu der Vermutung geführt, daß *im Untergrunde der Erde zyklonenartige Vorgänge stattfinden* (Fig. 175), die diese Anordnung der Gebirge bewirken. Eine allgemeinere Ursache für derartige Unterströme, die lokal durchaus denkbar sind, wurde jedoch bisher nicht gegeben.

Auf die Möglichkeit, daß im Erdinnern *Umwandlungen von Elementen* zu Volumveränderungen führen, hat R. SONDER⁴⁾ hingewiesen.

Schließlich verlegt auch E. HAARMANN⁵⁾ die Ursache der „Tektogenese“, wie er statt Orogenese oder Gebirgsbildung schreibt, in die Tiefe. Er unterscheidet zwischen Primärtektogenese, unter der er alle primären Vertikalbewegungen zusammenfaßt, und Sekundärtektogenese, die alle von ersteren veranlaßten unter unmittelbarer Einwirkung der Schwere vor sich gehenden Bewegungen enthält. Er warnte insbesondere vor einer Überschätzung der Horizontalbewegungen, die lediglich in den obersten Schichten der Erde vor sich gingen, und hält Vertikalbewegungen für die alleinigen Grundursachen der Tektogenese. Sie treten oszillierend, bald schneller als Hebungen, dann wieder langsamer als Senkungen gleichzeitig-zirkumterran auf. Als Ursache,

¹⁾ Geological Magaz. 64, 263, 1927.

²⁾ Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge, Braunschweig 1921.

³⁾ Vgl. z. B. R. SCHWINNER, Vulkanismus und Gebirgsbildung, Zeitschr. f. Vulkanologie 5, 1920. — S. FUJIWHARA, Torsional form on the face of the earth, Japan. Journ. Astr. and Geophys. 3, 103, 1925. — F. RINNE, Petrographisch-geologische Anschauungen über den Mobilitätsgrad . . ., Forschungen u. Fortschritte 4, 321, 1928.

⁴⁾ Über die Ursachen der Erdkontraktion, Vierteljahrsschr. Naturf. Ges. Zürich 67, 1922.

⁵⁾ Über die Kraftquelle der Tektogenese, Zeitschr. Deutsch. Geolog. Ges. 78, 71, 1926. Während des Druckes erschien: Die Oszillationstheorie, Stuttgart 1930.

die nach dem vorstehenden weltumspannend sein muß, sieht HAARMANN Polbewegungen an, und die beobachteten Oszillationen der Erdkruste sind nach ihm der „sichtbare Ausdruck subkrustaler Massenverlagerungen, die das isostatische Gleichgewicht des Erdellipsoids nach erdumfassender Störung wiederherstellen. Das bewegliche Magma wird unter Einfluß von Zentrifugal- und Zentripetalkräften stellenweise zusammen- und abgezogen; es wird örtlich

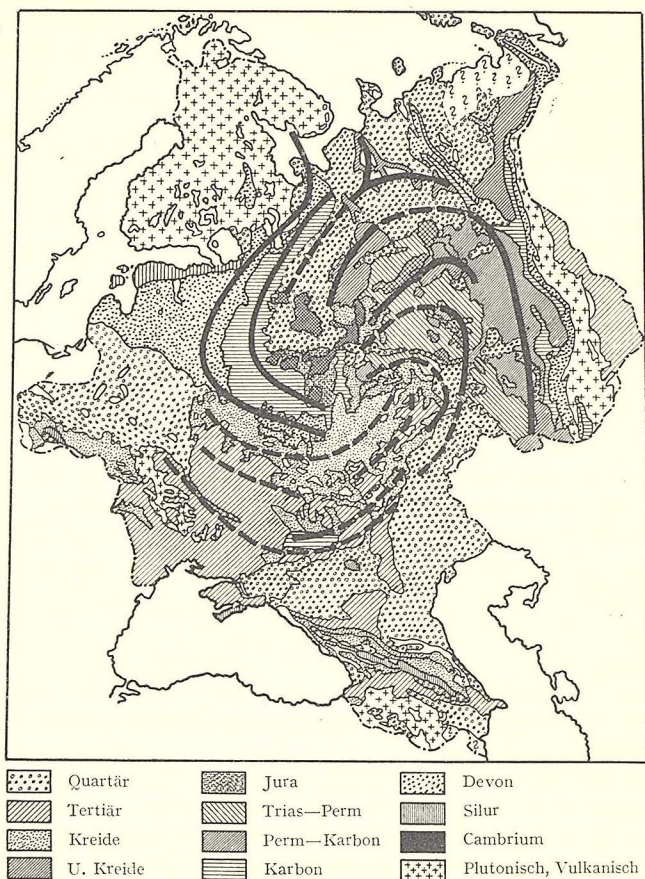


Fig. 174

Torsionale Struktur der Erdkruste in Osteuropa nach FUJIWHARA

angesaugt und in die Nachbarschaft abgesaugt, so daß sich Anschwellungen, Geotumoren, und Senken, Geodepressionen, bilden. Es entstehen also Unterströmungen“.

Die Verteilung der Kontinente auf eine „Landhalbkugel“ sucht HAARMANN so zu erklären, daß die eben gebildeten und noch leicht beweglichen Sialschollen zu einer derartigen Ausbalanzierung zusammendrifteten und dann in dieser Lage allmählich festfrozen; heute finden nach ihm derartige Bewegungen der Sialschollen zu großen Widerstand, die Massenverlagerungen finden nunmehr in den tieferen, jetzt relativ zu den Schollen leichter beweglichen Zonen der Erdkruste statt.

Als Ursache für die Unterströmungen betrachtet also HAARMANN offenbar die periodischen Polschwankungen — er spricht von meteorologischen Ursachen für diese —, doch sind die dadurch bedingten Gleichgewichtsstörungen (vgl. S. 23ff) viel zu klein. Merkbliche Kräfte ergeben sich nur bei Polwanderungen, auf die wir noch zurückkommen. Bei diesen treten dann aber wieder so große

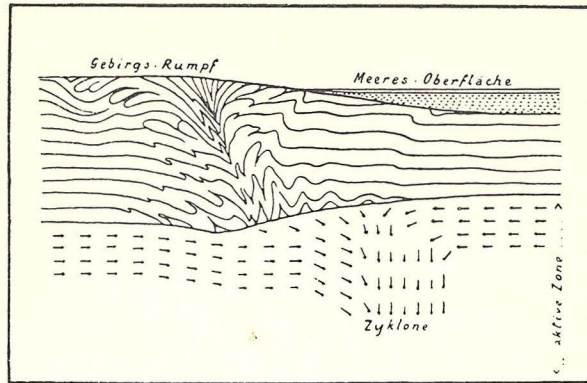


Fig. 175

Zyklone des subkrustalen Untergrundes mit passiven Krustenverschiebungen
nach SCHWINNER

Kräfte auf, daß dann die Annahme von primären Unterströmungen überflüssig wird. Im übrigen werden wir noch eine Reihe von Theorien kennenlernen, welche von Unterströmungen Gebrauch machen, jedoch treten diese dann als Folge, nicht als Ursache der Vorgänge auf¹⁾.

Kapitel 22

Sedimentation und Erosion als Ursache für tektonische Vorgänge

§ 259. Die Gleitfaltungshypothese von REYER²⁾ und die thermische Hypothese von READE³⁾. Schon relativ frühzeitig stellte man fest, daß in den Gebirgen besonders die sedimentären Schichten gefaltet sind. Es liegt daher nahe, einen Zusammenhang zwischen Sedimentation und Gebirgsbildung zu suchen. Die ersten umfangreicheren Theorien dieser Art rühren wohl von READE und von REYER her, die ihrerseits wieder auf ältere Theorien zurückgreifen. Nach ihren Ansichten ist die Sedimentation die Ursache von Erwärmung der Schichten, da diese infolge der Ablagerung in tiefere Zonen kommen, in denen die normale Temperatur höher ist. Nach der Ansicht der Anhänger dieser Theorien bewirkt die Ablagerung von 30 m Sedimenten an der Basis des betreffenden Blockes ein Ansteigen der Temperatur um 1°, und diese Steigerung vollzieht sich sukzessive in allen tieferen Schichten, endlich im Magma. Dabei soll sich die Ablagerung viel rascher vollziehen als der Temperatúrausgleich. REYER weist

¹⁾ Während des Druckes verwies W. JARDETZKY (Gerlands Beitr. 26, 167, 1930) auf die Möglichkeit, daß kosmisch bedingte Unterströmungen auftreten.

²⁾ Ursachen der Deformation und der Gebirgsbildung, Leipzig 1892.

³⁾ The Evolution of Earth Structure, London 1903.

nun selbst bereits darauf hin, daß die dadurch bewirkte Ausdehnung, selbst wenn sie wohl zur Geltung käme, ungenügend zur Erklärung der Gebirgsbildung wäre, da die Gebirgsbildung viel schneller erfolgt als die Sedimentation. Er modifizierte daher diese Ansicht, die hauptsächlich von READE ausgebaut worden war, in folgender Weise: Die Sedimentmächtigkeit ist in der Nähe der Küste, wo die meisten vom Wasser mitgenommenen Bodenteilchen zu Boden sinken, am größten und nimmt nach dem freien Ozean zu ab. Andererseits ist auch der Meeresboden in der gleichen Richtung geneigt. Infolge der stärkeren Sedimentation erwärmen sich die Schichten nahe der Küste am meisten, dehnen sich also auch am meisten aus, es entsteht ein stärkeres Gefälle nach dem Meere hin, das zu Gleitbewegungen der Massen Veranlassung gibt. Es kommt dann zu großen Massenbewegungen — infolge der Störung der Isostasie, würden wir heute sagen.

Gegen die beiden Theorien ist eine große Reihe von Einwänden erhoben worden. Wenn auch Gebirgsbildung auf diese Weise nicht möglich ist, so können doch derartige Vorgänge die Veränderung der Erdoberfläche beeinflussen. Eine Zusammenstellung von eigenen und fremden Einwänden hat NÖLKE gegeben (Geotektonische Hypothesen, a. a. O. S. 57 bzw. 40). Zunächst weist auch er auf den ungenügenden Betrag der bei der reinen thermischen Hypothese von READE sich ergebenden Hebung hin. Eine Sedimentation von 15 km würde nach seiner Rechnung ein Gebirge auftürmen können, das bei 100 km Breite durchschnittlich 600 m hoch wäre. Dann wird bei der Hypothese nicht die Volumverringerung der an und für sich besonders porenreichen Sedimente durch den zunehmenden Druck in der Tiefe berücksichtigt, der möglicherweise die Ausdehnung durch die Erwärmung kompensiert. Dann können Metamorphosen mit Volumenverkleinerung eintreten (Umwandlung in kristalline Schiefer). Der weltteilumspannende Wechsel zwischen Orogenesen und Epirogenesen wird nicht erklärt.

§ 260. Sedimentation und Geosynklinalen. Schon in § 250 hatten wir auf die Verknüpfung der Geosynklinalen mit der Sedimentation hingewiesen. Wir müssen nun etwas näher hierauf eingehen. In der Nähe der Küste ist, wie wir oben schon sahen, die Sedimentation am größten. Es wird sich also dort eine besonders starke Einbuchtung der obersten Erdschichten ergeben, die wir entsprechend den in § 249 angegebenen Beziehungen finden können. Ist d die Dicke der Sedimentschicht, h deren Erhebung über das Ausgangsniveau, $e = d - h$ deren Einbuchtung in die Unterlage, D die Dichtedifferenz zwischen der Dichte der Unterlage, die wir mit 3 annehmen wollen, und der Dichte der Sedimente, so ist

$$e = d - h = d \left(1 - \frac{1}{2} D\right) \quad \text{und} \quad h = \frac{1}{2} d D \quad . \quad . \quad . \quad (218)$$

Setzen wir noch zur Übersichtsrechnung die Dichtedifferenz Boden-Sediment gleich 1, was von der Wirklichkeit kaum allzuweit abweicht, so wird

$$e = h = \frac{1}{2} d,$$

d. h. der Meeresboden muß sich um gerade so viel gesenkt haben, wie die Sedimentoberfläche nach oben gewachsen ist. Setzen wir $D = \frac{1}{2}$, so ergibt sich analog

$$e = \frac{3}{4} d \quad h = \frac{1}{4} d.$$

Dabei ist jedoch im letzten Falle zu beachten, daß dann die Sedimente eine Dichte von mindestens $3 - \frac{1}{2} = 2\frac{1}{2}$ haben müßten, einen Wert, der für die in den Gebirgen komprimierten Sedimente reichlich hoch ist, um wieviel mehr für die frisch im Meere abgelagerten. Nun sind in Gebirgen Sedimentdicken von über 10 km vielfach, in einzelnen Fällen sogar solche von etwa 20 km fest-

gestellt worden. Setzen wir für die Sedimentdicke in Gebirgen $d = 12$ km ein, so ergibt sich für die Höhe h der Auflagerung über dem ursprünglichen Boden, also für die Verminderung der Wassertiefe während der Sedimentation, etwa 6 km, jedenfalls aber über 3 km (für $d = 20$ km sogar rund 10 km.). Es kommt noch hinzu, daß die Ausgleichsbewegungen zweifellos nachhinken, so daß also die Höhe des über dem Ausgangsniveau liegenden Teiles der Sedimente größer war als die Rechnung ergibt. Es folgt hieraus, daß die Sedimentation bei allen größeren Sedimentschichten in Tiefsee begonnen haben müsste. Dieses Ergebnis steht aber im Widerspruch zu den Ergebnissen der Geologen, die sich speziell mit diesem Problem befaßt haben und ganz übereinstimmend zu dem an und für sich plausiblen Ergebnis gekommen sind, daß die Ablagerungen fast ausschließlich in der Flachsee erfolgten (vgl. auch S. 395).

Zur Lösung des Widerspruchs bleiben im wesentlichen nur zwei Annahmen: Entweder der Meeresboden senkte sich regelmäßig während der Sedimentation noch aus anderen Gründen als durch das Gewicht der Sedimente. Hierfür ist aber kein Grund zu erkennen, wir sahen im Gegenteil, daß eher eine Erwärmung und Ausdehnung des Bodens zu erwarten ist, oder die in den Gebirgen vorhandenen Sedimentschichten waren ursprünglich viel dünner und sind, etwa während des Faltungsvorganges, aus einem horizontal viel ausgedehnteren Gebiet auf einen engeren Raum zusammengestaucht worden. Die zweite Lösung ist zweifellos viel plausibler.

Der Vorgang geschieht also vermutlich etwa folgendermaßen: in der Flachsee oder in der Nähe der Küste erfolgt Sedimentation. Der ursprüngliche Boden senkt sich langsam, die oberste, rund 20 km dicke Krustenschicht drückt sich etwas tiefer in die darunter liegende Schicht ein, diese fließt an ihrer Basis, die bereits in das Gebiet mit geringerem Fließwiderstand hineinreicht, etwas auseinander; durch die ganzen Vorgänge, auch mit Erwärmung ist zu rechnen, wird der Verband der Schichten immer mehr geschwächt, *es bildet sich eine mobilere Zone in der Erdkruste heraus, eine „Geosynklinale“*. Diese ist also im wesentlichen eine Folge der Sedimentation, wie auch mehrfach angenommen wurde; die Darstellung, als ob umgekehrt die Sedimentation in den Geosynkinalen (als Ursache) besonders kräftig sei, ist theoretisch kaum zu begründen. Andererseits wird kein größeres Gebiet der Erde auf die Dauer einen durch Sedimentation bewirkten Massenüberschuß von größerer Dicke tragen, ohne einzusinken; die Beobachtungen über den isostatischen Ausgleich in den stabilsten Zonen sprechen jedenfalls in diesem Sinne. Die Senkung unter der Last der Sedimente erfolgt also *auch* ohne ursprüngliche Existenz der Geosynklinale. Andererseits ist der Senkungsvorgang je nach der schon vorhandenen Mobilität der Zonen verschieden. Ein Teil der Flachseen ist vermutlich durch Dehnungsvorgänge entstanden und dadurch an und für sich schwächer.

Diese *mobile Geosynklinale kann nun zur Ausgleichsstelle für die in der Erdkruste vorhandenen Spannungen werden*, die nach unseren Betrachtungen S. 466 ff. in der Nachbarschaft dieser relativ zur Umgebung nachgiebigen Schichten besonders hohe Werte erreichen müssen (vgl. Fig. 169 S. 470). Treten Dehnungsspannungen auf, so wird die Erdkruste vor allem in den Geosynkinalzonen dünner, im Untergrund fließt Material nach, wir erhalten Meeresbecken mit geringerer Krustendicke, darunter in geringerer Tiefe Sima. Treten Pressungen auf, so werden die Geosynkinalschichten unter Wahrung des Gleichgewichtes gemäß unserer Darstellung in § 249 (S. 464) zuerst der Pressung nachgeben, die verhältnismäßig lockeren Sedimentschichten werden, wie oben erwähnt, zusammengestaucht und verfestigen sich unter chemischen oder physikalischen Veränderungen zu Gebirgen, die nunmehr ein geringeres spezifisches

Gewicht haben als ihre Nachbarschaft. Bei diesem Vorgang müssen die Drucke in erster Linie die Reibung überwinden, welche mit dem ganzen Vorgang verknüpft ist, falls dauernd das isostatische Gleichgewicht erhalten bleibt, was nach den Beobachtungen über die Isostasie nicht streng, in den Gebirgen aber mit einer gewissen Annäherung erreicht ist. Natürlich werden sich Störungen nach und nach etwas mildern.

Welcher Art diese Druckkräfte sind, folgt nicht aus dem Vorgang. Es können Kontraktionskräfte sein, die sich aber dann bei der Gebirgsbildung aufzehren, so daß die Gebirge auch dann nur die im folgenden Kapitel berechnete Maximalhöhe erreichen können, es können aber auch die andern S. 462/63 angeführten Kräfte sein, die dann noch unvermindert weiterwirken.

Ist der Vorgang beendet, so hat sich das Material durch die Gebirgsbildung verfestigt, die Geosynklinale existiert nicht mehr. In vielen Fällen wird sich nun in dem Meeresboden nahe der neuen Küste eine bereits in Bildung begriffene Geosynklinale durch die erhöhte Sedimentation längs der neuen Küste verstärken und während einer epirogenen Epoche so beweglich werden, daß sich in ihr dann der gleiche Vorgang wiederholt.

§ 261. Die Hypothese der thermischen Isostasie von SANDBERG¹⁾. C. G. S. SANDBERG ging davon aus, daß bereits die erste feste Kruste, welche aus der Verfestigung des Magmas hervorging, bei ihrer Bildung Niveauunterschiede zeigen mußte, da die Schollen mit der stärksten Abkühlung, also die dicksten Schollen, am tiefsten einsinken mußten, wenn das verfestigte Gestein spezifisch schwerer ist als das flüssige Magma. Auf diese Weise bildeten sich die ersten Einsenkungen in der Erdkruste, die Ur-Geosynklinale, die gleichzeitig die Ur-Ozeanböden waren.

„Mit der Vollendung der Kruste schreitet die Abkühlung an der Oberfläche der Erde bis zur Möglichkeit der Kondensation des Wasserdampfes fort. Wir befinden uns also in einem neuen Stadium, dem Zeitalter der Bildung einer Hydrosphäre und dem des Kreislaufes des Wassers. Die vorgebildeten Niveauunterschiede auf der Erdoberfläche ermöglichen das Einsetzen der Denudations- und Sedimentationsvorgänge. Diese bewirken wiederum eine Veränderung der verschiedenen Schalteile, und zwar deren Schwächung in den Geoantiklinalgebieten durch Abtragung (Denudation) und Verstärkung in den Geosynklinalgebieten durch Ablagerung der Denudationsprodukte (Sedimentation) auf die Kruste oder den Mantel bzw. die Schale.

Jede Änderung der Dicke der einzelnen Schalteile stört nun die isostatischen Verhältnisse. Aber diese Störung betrifft nicht nur das gravitative Gleichgewicht, d. h. die gravitative Isostasie, sondern auch das Gleichgewicht im Wärmehaushalt, die „thermische Isostasie“. Eine direkte Folge des letzteren Vorganges ist die Verfestigung des Magmas unter der Geoantiklinale und ein Abschmelzen der Kruste (bzw. des Mantels) unter der Geosynklinale, d. h.: Denudation und Sedimentation stören auch das Wärmegleichgewicht und damit auch wieder die isostatischen Verhältnisse.

Die weitere Folge davon sind isostatische (epirogenetische) vertikale Bewegungen der Geoantiklinal- und Geosynklinalgebiete, welche in zentripetaler und zentrifugaler Richtung verlaufen“ (Fig. 176).

Je länger die Denudation andauert, desto mächtiger werden auch die abgelagerten Sedimente, und desto näher kommen die untersten derselben den Tiefen, wo die Temperatur so hoch ist, daß sie der Einschmelzung unterliegen können. Hier macht sich nun die Wirkung des in den Poren der Sedimente enthaltenen

¹⁾ Geodynamische Probleme, Berlin 1924.

Wassers geltend. SANDBERG nimmt an, daß in rund 20 km Tiefe die Poren der Gesteine noch bis zu 40 % des Volumens betragen können, zumal die Sedimente anfangs besonders locker gelagert sind, daß anderseits das ursprünglich in den Sedimenten enthaltene Wasser während des ganzen Senkungsvorganges in diesen bleibt. Schließlich wird dessen Dampfdruck so groß, daß Teile der Geosynklinale aufgewölbt werden, oder daß die Dampfspannungen sich in vulkanischen Ausbrüchen äußern. SANDBERG sieht hierin die Ursache für den Zusammenhang zwischen Gebirgsbildung und Vulkanismus.

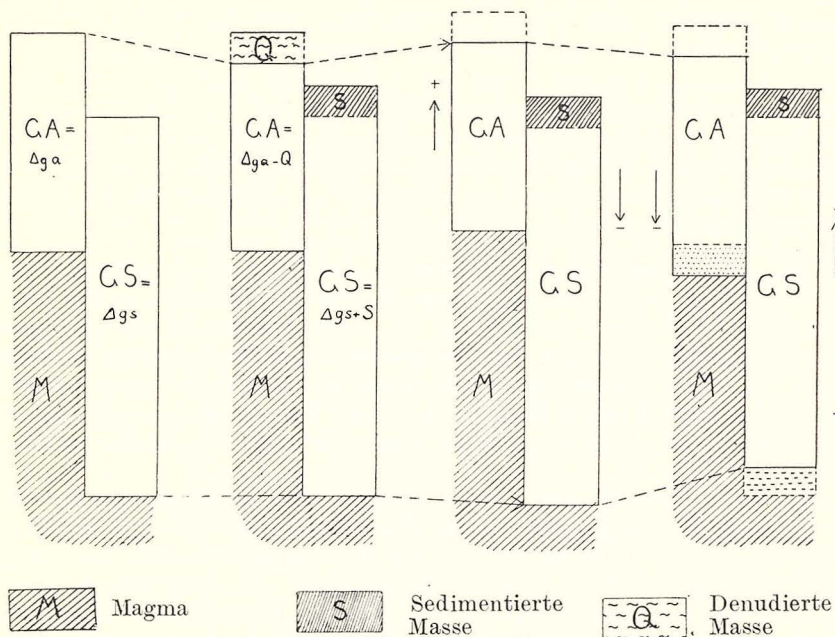


Fig. 176

Schematische Darstellung der gravitativen und thermischen Gleichgewichtsstörungen im Geosynklinal- (G.A.) und Antiklinalgebiet (G.S.) nach Sandberg.

Beim Studium der Hypothese von SANDBERG, die er noch durch eine Reihe von Experimenten zu stützen suchte, erkennt man sofort, daß die von ihm angenommenen Vorgänge recht wohl zutreffen können, daß aber offenbar der Druck des in den Poren enthaltenen Wassers nicht für die Gesamtheit der Vorgänge ausreichen dürfte. Wenn auch nach DAUBRÉE eine dünne Sandsteinschicht von nur 21 mm Dicke den unter einem Druck von mehreren Atmosphären stehenden Wasserdampf am Entweichen durch diese Sandsteinschicht hindurch verhindert, so folgt daraus doch noch nicht, daß das Wasser während der ganzen geologischen Epoche, in welcher sich der Sedimentationsvorgang abspielt, im überkritischen Zustand in den Sedimenten erhalten bleibt. Dann geht aber SANDBERG anscheinend von viel zu großen Dicken der abgelagerten Sedimentschicht aus. Nach seinen Rechnungen wäre in rund 25 km Tiefe der Gesteinsdruck etwa 60000 Atm., der Druck des in den Poren eingeschlossenen Wassers einige 10000 Atm., und es könne „daher angenommen werden, daß bei einer Temperatur von 1000° die erzeugte Spannung gleich oder vielleicht sogar größer sein wird, als der Gesteinsdruck der darüber lastenden Schichten“. In einer derartigen Tiefe haben wir aber wohl kaum noch Sedimente. Anderseits

wird die von SANDBERG für seine Rechnungen zugrundegelegte Temperatur von 1000° vermutlich erst in wesentlich größeren Tiefen (40 km) erreicht. Immerhin können lokal derartige Vorgänge, wie sie SANDBERG beschreibt, in kleinerem Umfange vorkommen.

§ 262. Erosion und Denudation als Ursachen für geotektonische Vorgänge. Während die Sedimentation auf relativ schmalen Räumen erfolgt, bewirken Erosion und Denudation eine Entlastung von viel größeren Gebieten, so daß es viel weniger leicht zu größeren Spannungen kommt. Andererseits wird bei der isostatischen Hebung, welche durch die Erosion bedingt ist, die Kruste im Gegensatz zu Sedimentationsgebieten nicht wesentlich geschwächt. Fast in dem gleichem Maße, in dem oben Material abgetragen wird, kann am unteren Ende solches ankristallisieren. Der Verband der Scholle wird nicht gelockert. Andererseits darf man nicht übersehen, daß durch die Abtragung erhebliche Änderungen der Belastung und damit nach oben gerichtete Spannungen auftreten können. So ist z. B. die *mittlere Abtragung* im Gebiete der Ströme Vorder-Indiens von der Größenordnung 2 m in 10000 Jahren.

Hypothesen, die Erosion und Denudation in den Vordergrund stellen, wurden anscheinend nicht aufgestellt. Ihre Mitwirkung bei geotektonischen Vorgängen wurde bereits bei SANDBERG erwähnt. Unter anderen haben auch DALY und BOWIE auf ihre Bedeutung hingewiesen.

Kapitel 23

Kontraktions- und Expansionstheorien

§ 263. Einleitung. Nachdem wohl zuerst DESCARTES den Gedanken ausgesprochen hatte, daß die Abkühlung der Erde eine Schrumpfung zur Folge haben müsse, befaßten sich unter anderen E. DE BEAUMONT und J. DANA, vor allem aber E. SUESS mit diesem Problem. Nach SUESS erfolgt das Zusammensinken der Erdkruste ungleichmäßig, die Folge davon ist Bildung von Niveauunterschieden und Gebirgen. Die der Isostasie widersprechende Annahme, daß die Bildung des Unterschiedes zwischen Ozeanböden und Kontinenten nur auf diese Weise erfolgt sei, ist wohl allgemein aufgegeben worden. Auf der andern Seite wurde auch von einzelnen Forschern auf Grund verschiedener Theorien angenommen, daß sich die Erdkruste ausdehnt, im Prinzip ergeben sich dann die gleichen Folgerungen. Wir wollen nun im folgenden einige Ansichten über die Wirkungsweise der Kontraktion kennen lernen, dann auf die grundlegenden theoretischen Betrachtungen von H. JEFFREYS eingehen, und zum Schluß die Folgerungen ziehen.

§ 264. Die Darstellung von R. A. SONDER¹⁾. Zu den eingehendsten Darstellungen der Kontraktionstheorie vom geologischen Standpunkte gehört die Arbeit von SONDER. Er führt folgende „*Postulate*“ an, welche man machen muß, um die Gebirgsbildung aus der Erdkontraktion heraus zu erklären:

1. *Die Erde kontrahiert sich.*
2. *Die feste Erde kann sich über dem unterliegenden Material verschieben.*
3. *Die tektonische Rinde ist in der Lage, die zur Erzeugung der Gebirge notwendigen Stresse allmählich aufzuspeichern.*

¹⁾ Die erdgeschichtlichen Diastrophismen . . . Geolog. Rundschau 13, 217, 1922.

„Man muß nach ganz allgemeinen Kriterien suchen, welche die Gebirgsbildung als solche charakterisieren, und von denen man sagen kann, daß sie unbedingt erfüllt sein müssen. Folgende drei Punkte dürften diesen Bedingungen genügen:

1. *Der Rindenüberschuß und seine Größenordnung.*
2. *Die Größenordnung der gebirgsbildenden Kräfte.*
3. *Die räumlich-zeitlichen Merkmale der Orogenesen.*“

SONDER geht nun auf diese Punkte näher ein. Die Rindenstauchung ist Tatsache. Die Existenz der Stauchung kann nur erklärt werden durch entsprechenden Massenabzug (SONDER schreibt hier viel zu speziell „Spalten“) an anderer Stelle, durch Massenzuwachs der äußeren Rindenteile (Aufsteigen von Magma) oder durch Erdkontraktion. Die erste Möglichkeit schaltet SONDER, offenbar infolge ihrer zu speziellen Fassung, als nie beobachtet aus und zeigt dann, daß die Erdkontraktion den Tatsachen viel besser entspricht als die Annahme von magmatischen Aufwölbungen.

Die Größe der Kräfte, die zur Gebirgsbildung nötig waren, ist nach SONDER so enorm, daß sie nur durch die bei der Kontraktion auftretenden Drucke erklärt werden kann.

Schließlich zeigen die geologischen Untersuchungen, „daß jede der sehr intensiven postkambrischen Gebirgsbildungen (Deckengebirge) auf der ganzen Erde in gewisse Hauptfaltungsphasen zu verlegen sind, wobei jeweils zwei relativ nahe beieinander liegen. Aus dieser Tatsache kann man mit ziemlicher Sicherheit schließen, daß der Gebirgsbildung eine Ursache zugrunde liegen muß, welche gleichzeitig auf der ganzen Erde faltungsreife Zustände schafft. Jedwede Erklärung, welche auf rein örtliche Ursache abstellt, scheint demnach von vornherein sehr problematisch. Die Kontraktionslehre paßt sich wiederum ausgezeichnet diesen Verhältnissen an.“

Dieser Auszug aus den Ergebnissen von SONDER, die er im einzelnen durch Beispiele und Angabe von Beobachtungstatsachen belegt, beleuchten das Problem in vorzüglicher Weise. Sie lassen in Verbindung mit der von JEFFREYS gegebenen Bestätigung für die drei oben angegebenen Postulate erkennen, daß die reine Kontraktionstheorie mit der Lösung der Frage nach der Größe der Erdkontraktion steht und fällt.

§ 265. Die Entstehung der Meere nach TRABERT und GESZTI. W. TRABERT¹⁾ versuchte, die Entstehung der Meere durch die verschiedene Kontraktion der Erde zu erklären. Er ging davon aus, daß der Meeresboden durch stärkere Kontraktion entstanden sei, und daß daher seine größere Dichte stamme. Die mittlere Tiefe der Ozeane beträgt etwa 4300 m, die Temperatur ist dort 0°, unter den Kontinenten in gleicher Tiefe dagegen etwa 140°. Unter dem Meere ist infolgedessen der Temperaturgradient und somit auch der Wärmestrom größer als in der kontinentalen Kruste, es findet dort stärkere Abkühlung und somit stärkere Kontraktion statt, der Meeresboden sinkt stärker als die Oberfläche der Kontinente. TRABERT vermutet nun, daß die ganze Depression der Meeresböden auf diese Weise entstanden sei. Er findet, daß dies theoretisch durchaus möglich sei, machte jedoch die völlig unzulässige Voraussetzung, daß sich das ganze Erdinnere gleichmäßig kontrahiert. Sei D die Höhendifferenz zwischen Kontinent und Ozean, a der Wärmeausdehnungskoeffizient, d die Dicke der abgekühlten Schicht, t die mittlere Temperaturdifferenz zwischen einer kontinentalen und ozeanischen Säule, so ist ganz roh $D = a d t$, oder für

¹⁾ Lehrbuch der kosmischen Physik, S. 561, Leipzig 1911.

das im Laufe der Zeit chemisch gebunden wurde, wir müssen daher die Zahl 260 mit einem Faktor c multiplizieren, der etwas größer als 1 ist. In Tabelle 57 sind auszugsweise einige Werte von GESZTI zusammengestellt. Man erkennt, daß im Laufe des Vorganges die ursprünglichen Wannen unter der Voraussetzung, daß sie die gleiche Dimension besaßen, wie heute und alles Wasser faßten, mit $370 - 260 = 110$ Atm. belastet wurden; gleichzeitig sank der Druck der Atmosphäre über den Kontinenten um $260 - 1 = 259$ Atm. Zum isostatischen Ausgleich mußten sich also die Meeresböden um $1100 : 3 = 360$ m senken, die Kontinente um $2590 : 3 = 860$ m heben, es ergibt sich also eine Sprungdifferenz von 1,2 km, wie in der Tabelle schon direkt gefunden war. Die Zusammenstellung zeigt jedenfalls — auch wenn die einzelnen Werte nur sehr unsicher sind —, daß vorhandene Niveaudifferenzen durch Kondensation um einen Betrag von der Größenordnung 1 km vergrößert werden konnten.

Tabelle 57

Bei der Temperatur t niedergeschlagene Wassermenge w auf die ganze Erde verteilt, W auf die heutigen Ozeane reduziert, b Höhe der entsprechenden Gesteinsschicht mit gleichem Gewicht

t Grad C	w km	W km	$b = W : 3$ km
374	0,35	0,5	0,2
344	1,0	1,5	0,5
314	1,5	2,1	0,7
254	2,2	3,1	1,0
194	2,5	3,5	1,2
100	2,6	3,7	1,2
10	2,6	3,7	1,2

GESZTI untersuchte nun auch weiter die Niveauänderungen der Schollen, die durch die Abkühlung bedingt waren. Er findet für zwei mit Wasser bedeckte Schollen

$$\Delta\lambda = \frac{\delta - 1}{\delta(\gamma_0 - 1)} (h_1 \gamma_1 - h_2 \gamma_2 - d) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (222)$$

wo $\Delta\lambda$ die Änderung der Distanz der Schollenoberflächen voneinander ist, γ die Dichte des Magmas vor der Abkühlung, $\delta\gamma_0$ nachher, h_1 und h_2 die Dicken der beiden Schollen, γ_1 und γ_2 ihre Dichten, d die Differenz der Oberflächenniveaus der beiden Schollen am Ende des Vorganges. In erster Annäherung kann d in der zweiten Klammer vernachlässigt werden. Andererseits ist $h_1\gamma_1$ stets größer als $h_2\gamma_2$, falls sich der Index 1 auf die Scholle mit dem größeren Tiefgang bezieht, wie bei der Ableitung angenommen war. Da bei Abkühlung $\delta > 1$ ist, muß in diesem Falle $\Delta\lambda$ positiv sein, d. h. die höhere Scholle mit der geringeren Dichte steigt stärker als die andere. Nimmt man etwa einen Kontinent an, der gerade überflutet wird, im übrigen den Aufbau von Europa besitzt, daneben eine Scholle mit den Eigenschaften des Untergrundes des Atlantischen Ozeans, so wird etwa

$$h_1 \gamma_1 = 126 \text{ km}, \quad h_2 \gamma_2 = 73 \text{ km}, \quad d = 5 \text{ km}$$

und demnach

$$\Delta\lambda = 48 \frac{\delta - 1}{\delta(\gamma_0 - 1)} \quad \text{und für } (\gamma_0 - 1) = 2 \quad \Delta\lambda = 24 \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) = 24 \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma}\right),$$

wo γ die Dichte des Magmas nach der Abkühlung ist, γ_0 vorher. Nun ist etwa $\delta = 1 + \alpha (\Delta t)$, wo α der kubische Ausdehnungskoeffizient ist und Δt die Abkühlung. α ist von der Größenordnung 10^{-4} bis 10^{-5} . Für eine Abkühlung um 1000° wird also $\Delta \lambda$ höchstens von der Größenordnung 1 km. Bei der Ableitung der Formeln hat aber GESZTI die Abkühlung in den Schollen selbst vernachlässigt. Wir finden also, daß die Schollenoberflächen sich infolge der Abkühlung der Erdkruste um weniger als 1 km gegeneinander verschieben, sofern keine Kristallisation erfolgte.

Bei der Kristallisation selbst konnten allerdings größere Schwankungen vorkommen, da δ dann die Größenordnung 1,1 und somit $\Delta \lambda$ Werte von 2–3 km — immer wieder unter den mehrfach erwähnten Voraussetzungen — erreichen kann. Es folgt hieraus aber nur, daß in jenen frühen Zeiten der Erdgeschichte einmal beim Kristallisieren der Schollen Verminderungen bereits vorhandener Niveaudifferenzen an der Erdoberfläche stattgefunden haben müssen, dann bei der Kristallisation des Untergrundmaterials (Magma, Sima) entsprechende Vergrößerungen. GESZTI weist mit Recht darauf hin, daß auf diese Weise isostatische Hebungen von Schollenteilen über die Meeresoberfläche und Senkungen unter diese vorgekommen sein müssen. Für die Deutung der nachkarbonischen Vorgänge haben aber diese Ergebnisse keine allzugroße Bedeutung, da die Abkühlung der obersten Schichten seit jener Zeit zweifellos nicht mehr erheblich war und insbesondere die Kristallisationstiefe schon damals unterhalb der unteren Grenze der Kontinentalsockel lag.

Eine Schwankung der Meereshöhe entstand dadurch, daß die Wärmeausdehnung des Wassers erheblich ist. GESZTI berechnete, daß die maximale Wasserhöhe unter Berücksichtigung der in Tabelle 57 berechneten Werte bei einer Wassertemperatur von etwa 200° eintrat. Die in Tabelle 58 angegebenen Werte sind seiner Tabelle entnommen.

Tabelle 58
Wasserhöhe der Ozeane bei verschiedener Wassertemperatur
während der Bildung der Ozeane

Temperatur des Wassers	Dichte des Wassers	Wasserhöhe in km bei 10° nach Tabelle 57	Wasserhöhe in km bei der angegebenen Temperatur
320	0,66	1,45	2,19
250	0,79	1,95	2,76
230	0,82	2,31	2,81
200	0,86	2,44	2,83
150	0,92	2,55	2,79
100	0,96	2,59	2,68
10	1,00	2,60	2,60

Es mußten also in jenen Epochen, die der vorgeologischen Zeit angehören, erhebliche Überflutungen von kontinentalen Teilen vorgekommen sein. Falls die Höhenverteilung damals ähnlich war wie heute, muß das Wasser damals rund 200 m höhergestanden haben.

Unsere Folgerung aus den Untersuchungen von GESZTI muß zusammenfassend lauten: Durch die Abkühlung der Erde wurden bereits bei der Bildung vorhandene Niveauunterschiede erheblich beeinflußt und zwar vorwiegend vergrößert. Für die eigentliche geologische Geschichte der Erdkruste haben diese Vorgänge jedoch keine wesentliche Bedeutung.

§ 266. Ansichten von R. A. DALY¹⁾ über die Wirkung der Kontraktion. Während die Geologen im allgemeinen annahmen, daß die Kontraktion eine Faltung hervorrufe, der Hauptvorgang also nach oben statfinde, rechnet DALY damit, daß auch *Teile der Erdkruste nach unten absinken* können, und zwar nicht nur bei Kontraktion, sondern auch bei anders wirkenden Kräften. Hierin liegt ein ganz wesentlicher Fortschritt gegenüber den älteren Theorien. Während bei diesen immer wieder der Versuch gemacht wurde, alle Erscheinungen auf eine einzige Ursache zurückzuführen, und darum immer irgendwelche unwahrscheinliche Annahmen notwendig wurden, rechnete DALY mit der Wirkung von mindestens drei Ursachen für Umbildung der Oberflächenformen auf der Erde; diese sind die Kontraktion, die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit und die Erosion. An dieser Stelle interessiert uns nur die erste.

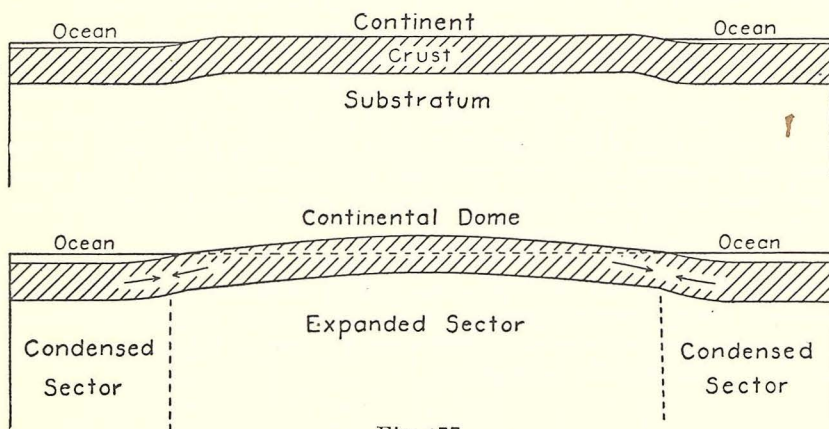


Fig. 177

Vorgänge bei der Aufwölbung eines Kontinents nach R. A. DALY
(Aus: Our mobile Earth)

Schon bald nach Beginn der Kristallisation bildete sich an der Erdoberfläche eine der heutigen ähnliche Temperatur heraus. In der Folge zogen sich dann nur tiefere Teile der Erdkruste zusammen, jedoch nicht mehr die äußersten Teile der Kruste, diese mußten also einsinken. Dies geschah nach DALY zuerst unter den Ozeanen, die Kontinente wölbten sich dadurch auf (Fig. 177). An ihrem Fuße entstanden Spannungen, es bildeten sich dort Geosynklinale aus, Sedimente häufen sich dort an, schließlich bricht die Kruste (Fig. 178) an der Geosynklinale, wo sie besonders schwach ist, der Rest der Kruste sucht sich nach Aufhören der Druckkräfte in die alte Lage einzustellen. Die weiteren Vorgänge hängen in hohem Maße von der Beschaffenheit des Substratums ab. DALY bezeichnet diese Hypothese, die er noch weiter ausgearbeitet hat, deren Erörterung jedoch in diesem Abschnitte zu weit führen würde, als „down-sliding“ oder „landslide“ Hypothese (*Abgleithypothese*). Fig. 178 ist für eine Geosynklinale auf dem Kontinent gezeichnet, ganz analoges gilt natürlich auch für eine ozeanische Geosynklinale.

§ 267. Die Kontraktionswärme. Falls sich die Erde kontrahiert, so nimmt ihre potentielle Energie ab, und zwar ist das Potential einer *homogenen Erde* in bezug auf sich selbst

¹⁾ Our mobile Earth, New York 1925, S. 265ff.

$$\Pi = -\frac{3}{5} \frac{k M^2}{r} \dots \dots \dots (223)$$

wo M die Masse, r der Radius der Erde und k die Gravitationskonstante ist. Verkürzt sich etwa der ganze Erdradius gleichmäßig um 1 mm, so ergibt sich, worauf wohl zuerst NÖLKE (a. a. O.) hingewiesen hat, eine Verkleinerung der potentiellen Energie der Erde, der eine Wärmemenge von $8,3 \cdot 10^{21}$ Grammkalorien entspricht. Dies wäre unter den von NÖLKE gemachten Annahmen rund das Dreißigfache der Wärmemenge, die zu der Kontraktion der Erde um 1 mm durch Abkühlung nötig ist. Diese Rechnung macht zunächst drei

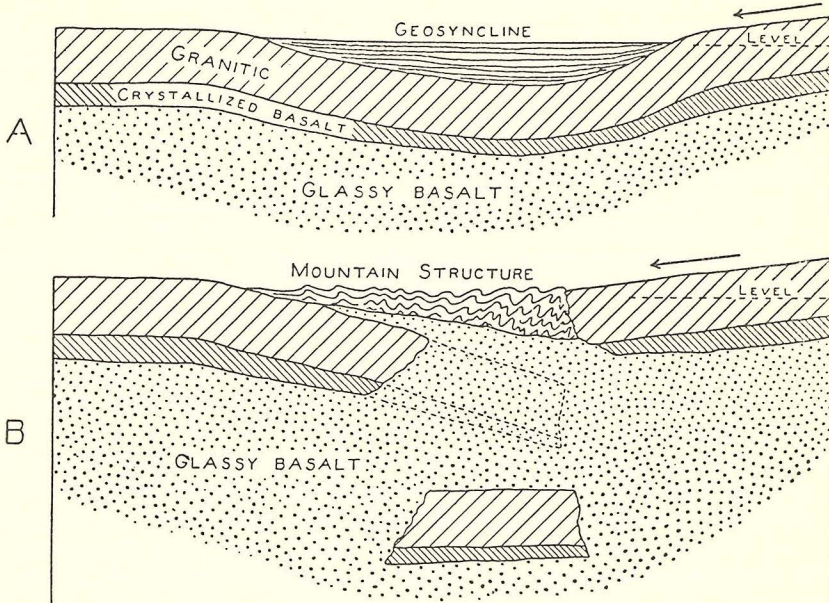


Fig. 178

Faltung einer Geosynklinale beim Abgleiten eines großen Blockes der Erdkruste nach R. A. Daly („Our mobile Earth“)

Voraussetzungen, die nicht erfüllt sind: Daß sich die Erde gleichmäßig kontrahiert, daß sie homogen ist, und daß die ganze, freiwerdende Energie in Wärme umgesetzt wird. Würde sich wirklich die ganze Erde kontrahieren, so würde ein Teil der dabei frei werdenden Energie eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit bewirken. Andererseits vollzog sich nach der Theorie (vgl. Band 2) die Abkühlung seither im wesentlichen in den obersten Schichten, zum größten Teil innerhalb der obersten 100 oder 200 km des Erdradius. Infolgedessen ist die Änderung der potentiellen Energie ganz erheblich viel kleiner als sich nach der obenstehenden Rechnung ergibt. Eine Übersichtsrechnung führte z. B. O. SCHMIEDEL¹⁾ aus. Unter der Voraussetzung, daß die Kontraktion nur in dem äußeren Zehntel der Erde vor sich ging, fand er, daß etwa 40 % der ausgestrahlten Wärme durch die Kontraktion der Erde wiedergewonnen wird. Auch dieser Wert ist zweifellos noch *wesentlich zu hoch*. Die sich kontrahierende Schicht ist in der Praxis etwa 3 % der Erde, sie besitzt zudem die kleinste Dichte.

¹⁾ Das Alter der Erde nach dem Abkühlungsprozeß. Berlin 1927.

Für eine genauere Rechnung fehlen die Grundlagen. Sie dürfte natürlich nicht so erfolgen, daß erst die Schrumpfung und hieraus die Ausdehnung berechnet wird, sondern es müßte eine Gleichgewichtsbedingung aufgestellt werden, die allerdings im vorliegenden Falle sehr kompliziert ist, da sowohl die Schrumpfung der Radiuselemente wie die Kontraktionswärme sehr verwickelte Funktionen des Radius sind. Wir finden jedenfalls, daß die Schrumpfung der Erde durch die Kontraktionswärme etwas vermindert wird, und zwar wohl um weniger als 20 %, vielleicht sogar um nicht einmal 10 %.

Die kontrahierte Kruste sucht ferner etwas schneller zu rotieren als die Schichten, die ursprünglich in den betreffenden Niveaus lagen; es ergibt sich hierbei eine schwache *Ostdriftkraft* in der Erdkruste.

§ 268. Die Kernschrumpfungstheorie von NÖLKE¹⁾. NÖLKE geht davon aus, daß auf der einen Seite, wie wir sahen, die Kontraktionstheorie eine sehr einfache Deutung der Entwicklung der Erdkruste gibt, auf der andern Seite aber die durch die Abkühlung erzeugte Kontraktion, besonders bei stärkerem Radiumgehalt der Kruste oder stärkerer Wirkung der Kontraktionswärme, nicht ausreicht, um die beobachtete Schrumpfung zu erklären. Er vermutete daher, daß die Kontraktion in erster Linie durch eine Schrumpfung des Erdkernes verursacht wird.

„In einem gewissen Entwicklungsstadium bildete sich um den Gaskern der Erde aus flüssigen Kondensationsprodukten eine mächtige Mantelschicht, in welcher Dichte, Druck und Temperatur den Massen den festen Aggregatzustand vorschreiben. Die Temperatur des Mantels ist, abgesehen von der äußersten Krustenschicht, wo sich ein Temperaturgefälle herausbildet, ungefähr konstant und verhältnismäßig niedrig. Im Gaskern nimmt die Temperatur nach dem Mittelpunkt hin zu.

Die äußersten Schichten des höher temperierten Gaskerns geben durch Leitung einen Teil ihrer Wärme an den Mantel ab. Dadurch wird ihre Spannkraft geringer, sie vermögen den Mantel nicht mehr zu tragen, und dieser sinkt nach. Die entstehende Kontraktionswärme erhöht wieder die Temperatur besonders der äußeren Schichten des Gaskerns, und der Vorgang wiederholt sich. Wegen ihrer verhältnismäßig niedrigen Temperatur vermögen die Mantelmassen ziemlich große Wärmemengen aufzunehmen.“ NÖLKE verfolgt dann auf dieser Grundlage unter Benutzung der Untersuchungen von Emden über Gaskugeln den Kontraktionsvorgang weiter.

Die Schwäche der Theorie besteht vor allem darin, daß sie einen der vermutlich bei der Veränderung der Erdkruste tatsächlich beteiligten Vorgänge — die Kontraktion — als richtig erkennt, seine Ursachen aber irrtümlich für unmöglich hält, nun den Vorgang auf andere Weise zu deuten sucht und dabei zwangsweise zu einem Ausgangszustand kommt, der zwar nicht unmöglich, aber auch durch nichts begründet ist. Das Erdinnere hat sich vermutlich erst durch Mischung, später aber nur durch Leitung abgekühlt, und es liegt weder ein Grund zur Annahme vor, daß die den Kern umgebenden Mantelschichten wesentlich kälter sein sollten als der Kern selbst, noch, daß in seinen Tiefen überhaupt eine Abkühlung erfolgt (vgl. Band 2). Das von NÖLKE gebrachte Argument, daß die Temperatur von gewissen Schichten über deren kritischer Temperatur liegen müßte, beruht offenbar auf einem häufig vorkommenden Versehen; *die kritische Temperatur hat für unser Problem keinerlei Bedeutung*, denn es ist völlig gleichgültig, ob die Zwischenschicht der Erde amorph oberhalb oder unterhalb der kritischen Temperatur ist; andererseits kann der kristalline

¹⁾ Geotektonische Hypothesen, Berlin 1924; Geolog. Rundschau, 18, 121, 1926.

Aggregatzustand bei genügend hohen Drucken bei Temperaturen vorkommen, die beliebig hoch über der kritischen Temperatur liegen. In diesem Falle existiert nur noch eine Grenzkurve, die zwischen Kristall und (bei hohen Drucken fester) Schmelze; der einzige Unterschied gegenüber den Verhältnissen bei tieferen Temperaturen besteht darin, daß nunmehr der Übergang von der bei hohen Drucken festen zur flüssigen und auch von dieser zur gasförmigen Schmelze stetig erfolgt, daß also die Verdampfungskurve fehlt.

Die Hypothese von NÖLKE würde im übrigen eine weitere Zunahme des Wärmestromes aus dem Erdinnern ergeben, die Übereinstimmung der beobachteten und der berechneten geothermischen Tiefenstufe also verschlechtern.

§ 269. Argumente von H. STILLE¹⁾ für die Schrumpfungstheorie. Ausgehend von seinen Ergebnissen über die tektonischen Vorgänge (vgl. S. 450), insbesondere der Tatsache, daß die Gebirgsbildung ein nur zu ganz bestimmten Zeiten der Erdgeschichte, dann aber gleichzeitig in den verschiedensten Erdgebieten eintretender Vorgang ist, nahm H. STILLE eingehender Stellung zur Kontraktionstheorie. Nach ihm ist die Gebirgsbildung ein Zusammenschub vorher stark gesunkener und stark mit Sedimenten beladener Geosynklinalen (vgl. S. 390ff), der sich insbesondere in den Randzonen dieser gesunkenen Räume gegen die sie begrenzenden Festlandsschwellen („Rahmen“) ereignet. Dabei bewegt sich der der Faltung unterliegende und infolgedessen aufsteigende Gesteinsinhalt der Geosynklinalen im allgemeinen gegen die Festlandsschwellen vor und zum Teil sogar über diese hinweg. In den Zwischenzeiten haben wir epirogenetische Vorgänge.

Das warme Erdinnere schrumpft infolge der Abkühlung, die äußere Kruste, die bereits abgekühlt ist, schrumpft nicht mehr, sie sinkt vielmehr passiv dem schwindenden Kern — wir sagen vielleicht besser „der schwindenden Unterlage“, da sich alles in den obersten 200 bis 300 km abspielt — nach und muß Einengungen erfahren. In dem jetzt beginnenden Kampf um den Raum werden sich die stabilen, d. h. nicht oder schwer faltbaren Teile wie starre, plumpe Klötze verhalten, und kaum verbogen oder eingeeengt werden; die mobilen, d. h. die leicht faltbaren Gesteinsmassen müssen sich aber dann mit dem Rest von Raum, den die stabilen ihnen lassen, abfinden; sie falten sich und schieben sich sogar, nachdem sie aufwärts bewegt worden sind, über ihre starren Nachbargebiete hinweg.

Ursprünglich erfolgte die Faltung in allen möglichen Richtungen. Nachdem sich aber besonders mobile Zonen gebildet hatten, erfolgte die Faltung nach dem wohl zuerst von VON DEM BORNE²⁾ aufgestellten „Satz von der kleinsten tektonischen Arbeit“ (vgl. auch S. 451) in diesen Zonen. Die Schrumpfungstheorie ergibt so eine qualitativ gute Erklärung für die geotektonischen Vorgänge; eine Reihe von Einwänden, mit denen sich auch STILLE befaßt, sind unzutreffend, wie wir in § 271 sehen werden, es bleibt aber noch manche Frage ungelöst. Wir verweisen, abgesehen von der Frage nach der quantitativen Übereinstimmung, z. B. auf das Problem: Warum senkt sich in den Geosynklinalen auch vor der Sedimentation der Boden, wo doch durch die Schrumpfung dauernd wachsender Raummangel, also Kräfte entstehen müssen, die auf Auspressung leicht beweglicher Zonen hinwirken?

§ 270. Die Geosynklinal-Orogentheorie von KOBER³⁾. KOBER führte zunächst eine etwas abgeänderte Bezeichnungsweise für die Elemente der Erd-

¹⁾ Die Schrumpfung der Erde. Berlin 1922.

²⁾ Gerlands Beitr. z. Geophysik 9, 395, 1908.

³⁾ Der Bau der Erde, 2. Auflage, Berlin 1928.

kruste ein: Die alten, erstarrten Rindenteile bezeichnete er als „Kratogene“, die beweglichen, orogenetischen Zonen als „Orogene“, anderseits unterscheidet er zwischen den „Epirogenen“, dem Gebiet der Kontinente, und den „Pelagogenen“ oder „Ozeanogenen“, den Ozeanböden. Die Orogene sind zugleich die Zonen der Geosynklinalen. Die relativ schnellen Veränderungen der Orogene sind die Orogenesen, die langsamen Umformungen der starren Kratogene die „Kratogenesen“. Diese sind also im wesentlichen das, was sonst als „Epirogenese“ bezeichnet wird. Die Bildung der Ozeane ist eine Erscheinung für sich („Ozeanogenese“, „Thalattogenese“).

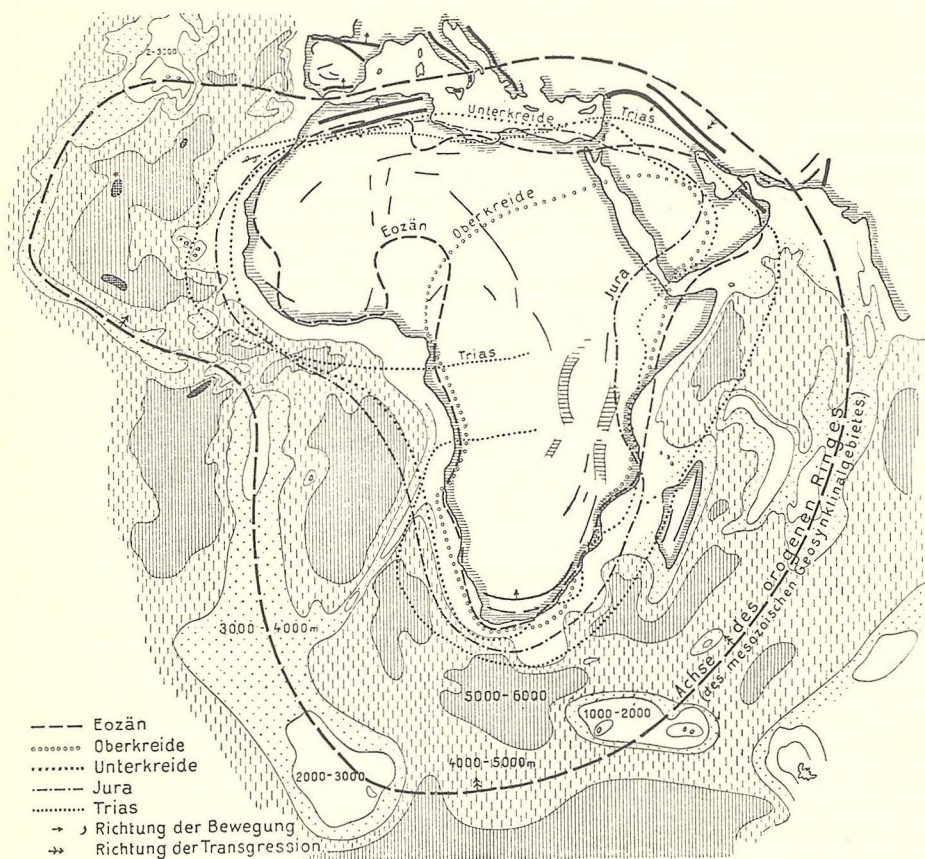


Fig. 179

Schema der geotektonischen Gliederung (orogene Ringe in verschiedenen geologischen Epochen) der afrikanischen Kontinentalplatte und der angrenzenden Ozeangebiete nach L. KOBER, DIENER UND HENNIG

Die Orogene (Geosynklinalen) sind Schwäche zonen der Erde von Anfang her, ihnen kommen bestimmte Gesteine zu, eine bestimmte Morphologie, ein bestimmter Vulkanismus, in ihnen erstarrt die Erde in Rhythmen. Ihr Bau ist zweiseitig, sie umschließen ringförmig die Kratogene (Fig. 179).

„Die orogenen Zyklen treten in der Geschichte des Epirogens mit aller Bestimmtheit hervor. Schon die älteren Geologen unterschieden: Den kaledonischen, den variszischen, den alpinen Zyklus. Dazu kommen noch die Zyklen der älteren geologischen Zeit. Die Zyklen sind Marksteine in der Entwicklung des

Epirogens. Wahrscheinlich beherrschen sie auch die Evolution des Ozeanogens. Die orogenen Zyklen schließen in sich: Die Zyklen der Gesteinsbildung, der Tektonik, der Morphologie, des Vulkanismus. Auch Klima und Leben wird durch sie weitgehend beeinflusst“.

„Die Kontraktionstheorie hängt mit der Zyklentheorie unmittelbar zusammen. Die Zyklen können nur aus einer Kontraktion der Erde verstanden werden . . . Auch die Zweiseitigkeit der Orogene kann als Beweis für die Kontraktion der Erde angesehen werden“.

Während die zuletzt erörterten Ansichten durchaus mit dem übereinstimmen, was wir selbst als Ergebnis finden werden, gilt das nicht für die Ansicht von KOBER über den Vorgang der Schrumpfung selbst, den KOBER in die Tiefe verlegt. Es ist hierfür für den Physiker absolut kein Grund ersichtlich, und auf der anderen Seite liegt auch keine Veranlassung vor, etwas derartiges anzunehmen, da wir ja tatsächlich mit einer Schrumpfung der Kruste rechnen müssen. Im übrigen geht KOBER kaum auf die Vorgänge, sondern in erster Linie auf den *tektonischen Zustand der Erde* ein. Auf Grund der Annahme, daß die Geosynklinalen ausgepreßt worden sind, vermutete er, daß die Kontinente früher wesentlich weiter auseinanderlagen als heute. Figur 180 zeigt nach KOBER

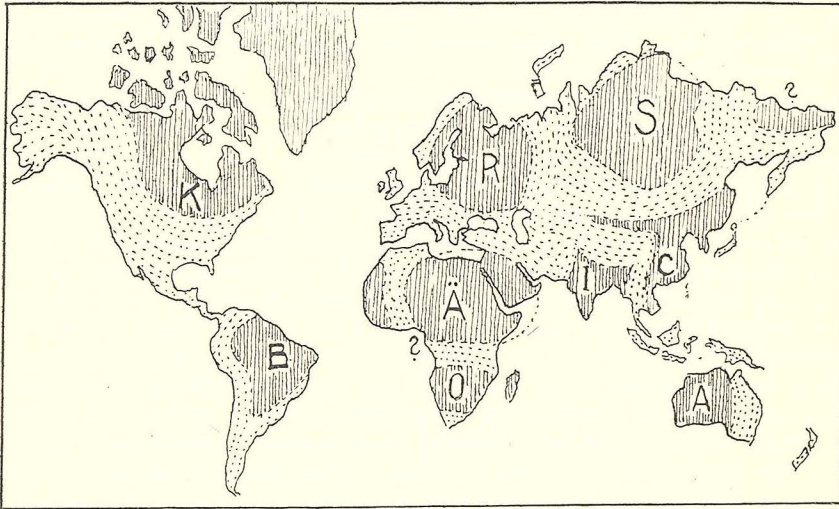


Fig. 180

Gliederung der heute sichtbaren Erdoberfläche zu Beginn des Paläozoikums in starre Schollen (schraffiert) und damals noch bewegliche Zonen (Meeresgebiete bzw. Geosynklinalen, punktiert). Nach L. KOBER, Der Bau der Erde

die starren Zonen (schraffiert) und die Geosynklinalgebiete (punktiert) zu Beginn des Paläozoikums, soweit diese Gebiete heute Land sind. Die Geosynklinalen wurden dann in den folgenden geologischen Epochen nach und nach ausgepreßt, die Urkontinente wurden dabei zum Teil verschweißt, die Geosynklinalen verschwanden mehr und mehr, und heute ist das Mittelmeergebiet der letzte Rest der großen Geosynklinalmeere der Vorzeit. Nach KOBER haben sich also die Geosynklinalen, die von Anfang an da waren und nicht neu gebildet werden, immer mehr verkleinert und vermindert; in diesem Zusammenhange sei auf die entgegengesetzte Ansicht von LINDEMANN (vgl. S. 511) verwiesen, nach der sich immer mehr schwache Stellen in der Erdkruste ausbildeten, die ursprünglich

völlig starr war. Auf das Geosynklinalproblem sind wir im übrigen ja schon S. 473 ff. eingegangen.

Nach KOBER schlossen sich also im Laufe der Zeit die kleinen Kontinente zusammen, es bildeten sich die Großkontinente der Gegenwart, die allseits von Brüchen begrenzt sind, so daß sich das Gebiet der Kontinente scharf von dem Ozeanogen trennt. Erstarrung ist demnach das Gestaltungsprinzip des Epirogens. Über das Ozeanogen können wir dagegen nur Theorien aufstellen. Anscheinend sind vor allem der Atlantische und der Indische Ozean ähnlich gebaut wie das Epirogen, während der Pazifik in Morphologie, Tektonik und in seinem sonstigen Verhalten starren Schollen ähnlich ist.

Schließlich stellte KOBER¹⁾ als Gestaltungsgesetz für die Erde folgende Hypothese auf: „Ozeane und Kontinente stehen im Ausgleich. Sie tragen sich selbst, angepaßt der Gleichgewichtsgestalt der Erde, ihrer Oberfläche. Damit ist aber auch die Größe der Kontinente gegeben“! Dieses „Gesetz“, daß also angenähert Wasseroberfläche gleich Landoberfläche mal deren Dichte sei, trifft aber weder tatsächlich zu, noch lassen sich physikalische Ursachen dafür angeben, worauf u. a. GUTENBERG²⁾ verwies.

§ 271. Theoretische Betrachtungen zur Schrumpfungstheorie. In den vorangehenden Erörterungen über die Schrumpfungstheorie haben wir eine Reihe von Voraussetzungen gemacht, deren Zulässigkeit wir nunmehr noch nachprüfen müssen. Wir folgen dabei im wesentlichen den Untersuchungen, die H. JEFFREYS³⁾ angestellt hat.

Ein oft gegen die Kontraktionstheorie erhobener Einwand, der im übrigen auch für die meisten anderen Theorien gilt, geht dahin, daß eine weltweite Spannung nicht durch Vorgänge auf einem eng begrenzten Gebiet ausgeglichen werden könne, daß also eine Gebirgsbildung höchstens in einem relativ kleinen Gebiet den durch die Schrumpfung bedingten Druck ausgleichen könne. Wir haben jedoch bereits S. 472 gezeigt, daß dieser Einwand unzutreffend ist, daß sich die Druckkräfte über große Gebiete fortpflanzen können, so daß etwa eine Aufwölbung längs eines Großkreises den durch die Kompression bei der Schrumpfung bewirkten Überdruck auf der ganzen Erde bis auf relativ kleine Reste vernichten kann.

Ein anderer Einwand ist der, daß bei der Schrumpfung des Erdinnern die Erdkruste wie ein Gewölbe frei stehenbleiben müsse, solange der Ausgleich nicht erfolgt sei, daß aber kein Material einen solchen Gewölbedruck aushalten könne. Zur Untersuchung dieses Problems vernachlässigen wir mit JEFFREYS den Unterschied zwischen Kontinenten und Ozeanen, so daß wir eine völlig symmetrische Kugel vor uns haben, in deren Mittelpunkt wir den Koordinatenanfang verlegen. Es seien ferner

u, v, w die Verschiebungen eines Punktes von der ursprünglichen Lage parallel den Achsen x, y, z ,

q die radiale Verschiebung,

r die Entfernung vom Mittelpunkt,

λ, μ die LAMÉschen Konstanten in dem betreffenden Volumelement.

Sei ferner zur Abkürzung gesetzt

$$D \equiv \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \dots \dots \dots (224)$$

$$\gamma = (3\lambda + 2\mu) n T' \dots \dots \dots (225)$$

¹⁾ Gerlands Beitr. z. Geophysik, 25, 163, 1930.

²⁾ Ebenda, 26, 158, 1930.

³⁾ The Earth, 2nd edition; besonders S. 286ff, Cambridge 1929.

wo n der lineare Ausdehnungskoeffizient,

T' die Temperaturänderung.

X_0, Y_0, Z_0 seien die Kraftkomponenten, die vor der Verschiebung auf das Teilchen wirken, pro Masseneinheit; in radialer Richtung wirkt die Schwere g , die natürlich eine Funktion des Radius r ist. Es ist dann

$$u = qx/r \quad v = qy/r \quad w = qz/r \quad \dots \quad (226)$$

$$X_0 = -gx/r \quad Y_0 = -gy/r \quad Z_0 = -gz/r \quad \dots \quad (227)$$

$$uX_0 + vY_0 + wZ_0 = -gq \quad \dots \quad (228)$$

Nach der Verschiebung ergibt sich für die Kraft pro Masseneinheit

$$X_1 = \left(X_0 - q \frac{dX_0}{dr} \right) \left(\frac{r-q}{r} \right)^2 = \frac{2gxq}{r^2} + \frac{qx}{r} \frac{dg}{dr} \quad \dots \quad (229)$$

analog Y_1 und Z_1 , also nach (224) und (229)

$$D = \frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 q)}{dr} \quad \dots \quad (230)$$

Für die neue Dichte ρ_1 gilt folgende Beziehung zur ursprünglichen Dichte ρ_0 :

$$\rho_1 = -\rho_0 D - q \frac{d\rho_0}{dr} \quad \dots \quad (231)$$

Nun gilt nach JEFFREYS (a. a. O., S. 163, Gleichung 20) folgende Beziehung:

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 \frac{d^2 u}{dt^2} = & \rho_0 X_1 + \rho_1 X_0 + \frac{\partial [\rho_0 (uX_0 + vY_0 + wZ_0)]}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda D + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]}{\partial z} - \frac{\partial \gamma}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (232)$$

Setzt man den Wert für ρ_1 in diese Gleichung ein, so findet man, daß alle Gleichungen erfüllt sind, wenn

$$\frac{d \{ (\lambda + 2\mu) D \}}{dr} - \frac{4q}{r} \frac{d\mu}{dr} - \frac{d\gamma}{dr} + \frac{4q}{r} g \rho_0 = 0 \quad \dots \quad (233)$$

Ist die Abkühlung der Erde bis zur Tiefe H fortgeschritten, so wird in dem Teil der Erde, der von der Abkühlung betroffen ist, dq/dr von der Größenordnung q/H , also groß gegenüber q/r . Bezeichnen wir den Erdradius mit r_0 , so ist in Gleichung (233) die

$$\begin{array}{llll} \text{Größenordnung des 1. Gliedes} & \lambda \rho_0 / H^2 \\ \text{,,} & \text{,,} & 2. & \text{,,} & \lambda q / r_0^2 \\ \text{,,} & \text{,,} & 4. & \text{,,} & g \rho_0 q / r_0. \end{array}$$

Da r_0 wohl mehr als hundert mal so groß ist als H , und λ eine hohe Zehnerpotenz so groß wie $g\rho_0$, kann das zweite und vierte Glied vernachlässigt werden, und Gleichung (233) reduziert sich auf

$$\frac{d}{dr} [(\lambda + 2\mu) D] - \frac{d\gamma}{dr} = 0 \quad \dots \quad (234)$$

mit der Lösung

$$D = \frac{\gamma}{\lambda + 2\mu} + \text{const.} \quad \dots \quad (235)$$

Die hinzukommenden Spannungen sind für einen Punkt der x -Achse

$$p_{xx} = \lambda D + 2\mu \frac{dq}{dr} - \gamma \quad \dots \quad (236)$$

$$p_{yy} = p_{zz} = \lambda D + 2\mu \frac{q}{r} - \gamma \quad \dots \quad (237)$$

$$p_{yz} = p_{xz} = p_{xy} = 0 \quad \dots \quad (238)$$

Aus Symmetriegründen ergibt sich, daß analog überall radiale und tangential Spannungen auftreten müssen. Die ursprüngliche Spannungsdifferenz war 0, die neu vorhandene Spannungsdifferenz, die für das Fließen (oder Brechen) des Materials ausschlaggebend ist, kann als Differenz der neu entstandenen radialen und tangentialen Spannungen gefunden werden. Wir bezeichnen die radiale Spannung mit P , die tangential Spannung mit Q . Dann ist nach (236) und (237)

$$\left. \begin{aligned} P - Q &= 2\mu \left(\frac{dq}{dr} - \frac{q}{r} \right) = 2\mu \left(D - \frac{3}{r^3} \int_0^r r^2 D dr \right) \\ &= \frac{2\mu}{r^3} \int_0^r r^3 \frac{dD}{dr} dr = \frac{2\mu}{r^3} \int_0^r r^3 \frac{d}{dr} \left(\frac{(3\lambda + 2\mu) n T'}{\lambda + 2\mu} \right) dr \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (239)$$

Setzen wir zur Abkürzung

$$\frac{(3\lambda + 2\mu) n T'}{\lambda + 2\mu} = \Theta \quad \dots \quad (240)$$

so ist also

$$P - Q = \frac{2\mu}{r^3} \int_0^r r^3 \frac{d\Theta}{dr} dr \quad \dots \quad (241)$$

JEFFREYS macht nunmehr zwei verschiedene Voraussetzungen:

1. Seit der Erstarrung der Erdkruste haben sich die Spannungen nicht ausgeglichen. Dann hat T' , die Abkühlung, ihr Maximum an der Oberfläche, $d\Theta/dr$ ist immer negativ, falls n , λ und μ kein anormales Verhalten zeigen, die radialen Spannungen P sind überall kleiner als die tangentialen Q . In diesem Zustand müssen also vertikale Brüche und horizontale Fließbewegungen in allen Tiefen vorherrschen.

2. Die Spannungen gleichen sich von Zeit zu Zeit aus, wir haben im übrigen die Werte einzusetzen, die wir heute beobachten. Die Temperaturänderung T' ist an der Erdoberfläche Null, wächst schnell zu einem Maximum mit negativem Vorzeichen und nimmt dann mit der Tiefe wieder auf Null ab. Analoges gilt dann für Θ . Bei der Berechnung von $P - Q$ muß man jedoch die Wirkung des Faktors r^3 beachten. An der Erdoberfläche wird infolgedessen $P - Q$ positiv und von der Größenordnung $r_0^2 H \Theta_1$, wo Θ_1 der numerisch größte Wert von Θ ist. In der nächsten Umgebung der Erdoberfläche überwiegen demnach radiale Spannungen, darunter wie im Falle 1 tangentiale.

Zu weitergehenden Ergebnissen kommt man, wenn man die radialen Spannungen P genauer betrachtet. JEFFREYS findet als Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{dP}{dr} = \frac{2(P - Q)}{r} + \rho g \quad \dots \quad (242)$$

Die Differenz der Spannungen P und Q kann die Bruchspannung, also etwa 10^9 CGS, nicht überschreiten, infolgedessen ist $2(P - Q)/r$ in der Nähe der Erdoberfläche höchstens 3 CGS-Einheiten, dagegen ist ρg etwa 3000 Einheiten.

Infolgedessen ist die vertikale Spannung praktisch von den Deformationen unabhängig, und auch bei Vorhandensein von Spannungen durch irgendwelche Kräfte fast die gleiche wie im ungestörten Zustand bei hydrostatischem Gleichgewicht.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen finden wir also, daß schon in ganz geringer Tiefe der durch die *Schrumpfung* erzeugte *horizontale Druck größer ist als der vertikale*; beide suchen das Volumen zu verkleinern. Solange keine Ausgleichsbewegungen einsetzen, suchen die einzelnen Schichten sich horizontal zu komprimieren, wobei also der Verband der Schichten in vertikaler Richtung gelockert wird.

Auf einen Einwand von HOLMES¹⁾, daß ja die Abkühlung im Verlaufe der Zeit immer langsamer erfolge, daß dagegen die Gebirgsbildung nicht zurückgehe, weist JEFFREYS darauf hin, daß bei den Ausgleichsvorgängen immer Restkräfte übrigbleiben, welche den in den folgenden Epochen sich bildenden Spannungen hinzuzurechnen sind. Trotz dieser Möglichkeit, die aber die zu erwartende Abnahme der Gebirgsbildung infolge der Kontraktion nur etwas abmildern, nicht aufhalten kann, bleibt der Einwand von HOLMES beachtenswert.

Wir haben also nunmehr folgendes Bild: Der größte Teil des Erdinnern, bis einige hundert Kilometer unter der Oberfläche, bleibt von der Abkühlung und den durch sie bewirkten Vorgängen unberührt. In den äußersten Schichten war die Abkühlung in den ersten Epochen nach der Bildung der Erdkruste recht kräftig, später wuchs die Zone, welche keine Abkühlung mehr erleidet. Dazwischen liegt eine mobile Zone, die sich am stärksten abkühlt. Schon diese Tatsachen führen zu einem wichtigen Schluß: Gerade in den ersten Epochen der Erdgeschichte, in der sich größere Schrumpfungsbeträge ergeben, erfolgte die Schrumpfung nur in den äußersten Schichten, d. h. es entstanden nur relativ geringe Kompressionsspannungen, in der Hauptsache erfolgte die Schrumpfung unter Volumverminderung aller schrumpfenden Schichten; nahezu in dem gleichen Maße, wie die Erdkruste schrumpfte, zogen sich auch ihre Materialien infolge der Abkühlung zusammen, eine stärkere Schrumpfung unter Gebirgsbildung war nicht zu erwarten.

Heute liegen nun die Verhältnisse anders. Im Hauptgebiet der Abkühlung hat das Material mit großer Wahrscheinlichkeit eine relativ kleine Fließfestigkeit, die Kontraktion wird also dort bewirken, daß das Material unter Fließen die neue Gleichgewichtslage einnimmt. In der äußeren Erdkruste bilden sich dagegen dann die Spannungen aus, die wir oben besprochen haben.

§ 272. Quantitative Betrachtungen zur Kontraktionstheorie. Wir sahen seither, daß die Kontraktionstheorie qualitativ die Beobachtungen im allgemeinen befriedigt; es bleibt nunmehr noch nachzuprüfen, ob dies auch quantitativ der Fall ist. Nach den erwähnten theoretischen Untersuchungen dürfen wir nunmehr voraussetzen, daß sich die Spannungen über die ganze Erde verbreiten, daß stetige Bewegungen (Epirogenese) ihnen entgegenwirken, daß sie aber schließlich eine solche Höhe erreichen, daß es an einer schwachen Stelle (Geosynklinalen) zu großen Umwälzungen kommt, große Massen werden in kurzer Zeit in der Oberfläche zusammen- und zum Teil herausgepreßt und bilden Gebirge (Orogenese). Dabei ist mit chemischen Veränderungen zu rechnen, die eine Veränderung der Materialdichte im ganzen, in Mitleidenschaft gezogenen Gebiet bewirken; daran, daß wir in den hohen Gebirgen besonders geringe Dichte finden, könnte auch ihr Aufbau aus den leichteren Sedimenten der Geosynklinalen schuld sein. Das Gleichgewicht stellt sich dabei wieder her, die Spannungen

¹⁾ Geological Magaz. 64, 274, 1927.

sind bis auf Reste ausgelöst und beginnen sich in der Folgezeit neu zu bilden. Wie groß sind nun diese Massen, die zum Ausgleich der Raumverminderung infolge der Kontraktion aus der Erdkruste herausquellen müssen?

Der größte Teil der Kontraktion findet, wie wir sahen, in der mobilen Schicht statt. Wir wollen nun einmal die Kontraktion der starren Schale vernachlässigen und haben für diese dann das folgende Problem: Die innere Fläche einer Kugelschale von der Dicke D wird um den Betrag d nach innen verschoben, die Dicke D bleibt die gleiche, um wieviel ändert sich der Kugelschaleninhalt?

Das Volumen einer Kugelschale ist gegeben durch $\frac{4}{3} \pi (a^3 - b^3)$, wenn a und b ihre Radien sind. Ersetzt man nun a durch $a - d$, wo d sehr klein gegen a ist, und analog b durch $b - d$, und bildet den Unterschied dieser beiden Schalen, so ergibt sich $V_1 - V_2 = D = 4\pi d (a + b) (a - b)$, a und b sind in unserem Falle fast gleich. Ist r der mittlere Radius, U der zugehörige Großkreisumfang, $a - b = H$, so erhält man für die gesuchte Volumendifferenz

$$D = 4 U H d \quad (243)$$

Nehmen wir nun weiter an, daß diese Massen ein Gebirge von der Höhe h und der Breite y längs eines Erdumfanges aufbauen, so wird

$$4 H d = h y \quad (244)$$

H , die Dicke der wenig mobilen Schicht, ist etwa 50 km, h , die mittlere Höhe der Gebirge, ist etwa 2 km, d , die Schrumpfung des Erdradius unter Nichtberücksichtigung des Teiles der Schrumpfung, welcher auf die obersten 50 km entfällt (vgl. S. 509), ist nach S. 11 unter Abzug der entgegenwirkenden Kontraktionswärme wohl höchstens 1 mm/Jahrhundert, also etwa 1 km in 100 Millionen Jahren, einer Zeit, die mehrere Epochen der Gebirgsbildung umfaßt. Wir erhalten dann $y = 100$ km, d. h. durch die Kontraktion der Erde infolge der Abkühlung hätte in 100 Millionen Jahren, also vielleicht seit Trias oder Jura, nur ein 100 km breiter Gebirgsgürtel von 2 km Höhe entstehen können. Die Grundlagen der Rechnung sind eher zugunsten der Kontraktion als gegen diese angenommen, auf der anderen Seite müssen wir auch die Abtragung seit der Entstehung in Rechnung setzen.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen wir, wenn wir von den Rechnungen von GESZTI (vgl. S. 464 ff.) ausgehen. Danach entspricht die Masse der Alpen etwa einer Verkürzung des Erdradius um 2 km, zu der nach unseren Rechnungen etwa die Abkühlung während 200 Millionen Jahren nötig gewesen wäre.

Wir finden also: *Die Kontraktion der Erde infolge der Abkühlung kann zwar einen Teil der Gebirgsbildung erklären, es müssen aber noch andere wesentliche Kräfte mitgewirkt haben.*

Die Kontraktionstheorie besitzt auch sonst einige Mängel. Direkte Beweise gegen die Kontraktionstheorie sind bisher wohl nicht vorgebracht worden.

Eine Dehnung der obersten Schichten ist schlecht mit ihr in Einklang zu bringen, auch nicht bei Kombination mit Unterströmungen; sie bietet ferner keine ungezwungene Erklärung für den Wechsel der Landverbindungen, und schließlich müßte doch eine Abnahme der Gebirgsbildung im Laufe der geologischen Epochen feststellbar sein, was aber den Beobachtungen nicht entspricht.

§ 273. **Expansions-theorien.** Auch der entgegengesetzte Gedanke von dem, mit welchem wir uns seither befaßt haben, wurde ausgesprochen, die Hypothese, daß die *Ausdehnung der Erde* die Ursache für die Gebirgsbildung sei. Diese Ansichten teilen die Mängel der Kontraktionstheorie, ohne deren physikalische

Grundlagen zu besitzen. So nahm ROTPLETZ an, daß das Magma bei der Kristallisation sein Volumen vergrößert, anderseits erblickte z. B. LINDEMANN¹⁾ in dem Radiumzerfall eine Ursache für stetige Erwärmung und *Expansion der Erde*. Im letzten Falle können wir auf die Argumente gegen die Hypothese von JOLY verweisen.

Kapitel 24

Die Gezeiten als Kraftquelle für tektonische Vorgänge

§ 274. Rotationsverzögerung durch Gezeitenreibung. Durch die Gezeitenreibung verzögert sich die Rotation der Erde ein wenig. Dabei muß theoretisch ihre Abplattung abnehmen. A. BÖHM²⁾ vermutete nun, daß dabei Gebirgsbildung erfolge, und zwar einmal dadurch, daß der Äquator entsprechend kürzer wird, dann dadurch, daß Spannungen zwischen den inneren und äußeren Schichten entstehen, da sich diese mit verschiedener Geschwindigkeit deformieren.

Auf dem gleichen Prinzip beruht die Theorie von A. BLYTT³⁾, der davon ausging, daß die Gezeitenreibung um so kräftiger wirkt, je näher der gezeiten-erregende Himmelskörper ist. Die Gezeiten hängen infolgedessen von der Exzentrizität ab, diese variiert ein wenig in Perioden von einigen zehntausend Jahren, also muß dies auch für die Verlangsamung der Erdrotation gelten, es entstehen Spannungen von wechselnder Größe und wechselnde tektonische Vorgänge.

Eine Kritik der Theorien finden wir wieder bei NÖLKE (a. a. O.). Als Haupt- einwand ist die geringe Wirkung hervorzuheben, welche die betreffenden Ur- sachen besitzen. Daneben kommt bei der Theorie von BLYTT noch hinzu, daß nicht die Sonne, sondern der Mond in erster Linie die Gezeiten bewirkt, und daß hierbei die Exzentrizität der Erdbahn keine Rolle spielt. Im übrigen sind die Perioden der Gebirgsbildung ein Vielfaches der Perioden der Erdexzentrizität. Die durch die Änderung der Pollage hervorgerufenen Spannungen müssen im übrigen ein hohes Vielfaches der hier betrachteten Spannungen erreichen können (vgl. die Tabelle S. 462 und § 5 S. 23).

§ 275. Die Gezeitenresonanztheorie von SCHWINNER⁴⁾. R. SCHWINNER geht von der Mondablösungstheorie aus. Nach Lösung des Mondes blieben Fragmente der ersten Erstarrungskruste als Kerne der späteren Kontinente übrig, daneben eine Fläche aus bloßgelegtem Sima, der Pazifik. Die weitere Entwicklung der Erde ist im wesentlichen ein thermodynamischer Vorgang. Wenn die Abkühlung in die Magmazone vordringt, erzeugt sie dann eine instabile Schichtung (etwa spezifisch schwereres oben), bis ein äußerer Anstoß eine Bewegung in Gang bringt. Dieser Anstoß wird nach SCHWINNER dadurch gegeben, daß die Gezeitenwelle in Resonanz mit einer freien Schwingung der Erde kommt, die von der Größenordnung eine Stunde ist. Bei der Abtrennung des Mondes betrug die Tageslänge nur einige Stunden. Der Montag hat ver-

¹⁾ Kettengebirge, kontinentale Zerspaltung und Erdexpansion, Jena 1927.

²⁾ Abplattung und Gebirgsbildung, Wien 1910.

³⁾ Kurze Übersicht über meine Hypothese von der geologischen Zeitrechnung. Geol. Fören. Förh. 12, Stockholm 1890.

⁴⁾ Astrophysikalische Grundlagen der Geologie, Mitt. d. Geolog. Ges. in Wien 19, 140, 1926.

mutlich erst auf einige Stunden ab-, dann wieder zugenommen, so daß mehrfach Resonanz zwischen Oberschwingungen der Gezeiten und der Eigenschwingung der Erde auftreten mußten. Jedesmal anläßlich einer derartigen Resonanz kam es zur Auslösung der Spannungen im Magma und zu Orogenesen.

Gegen diese Theorie sind leicht zwei gewichtige Einwände zu erheben; Zunächst fielen stets nur relativ hohe Oberschwingungen der Gezeiten mit der Eigenperiode zusammen. Sowohl der Mond- wie der Sonnentag blieben über 5 Stunden, so daß schon die vierteltägigen Gezeiten nicht in Resonanz mit der Eigenschwingung der Erde kamen. Derartige Gezeiten haben aber keine merklichen Amplituden mehr, so daß eine Resonanzwirkung nicht entstehen kann. Andererseits besteht nach unserer Auffassung kein Grund zu der Annahme, daß sich Spannungen über längere Zeiträume im Magma halten können, solche werden sich vielmehr durch Fließen ausgleichen. Den Einwurf, daß die Tageslänge sich früher viel schneller änderte, daß also die Orogenesen in immer größeren Zeiträumen aufeinander folgen müßten, sucht SCHWINNER unter Hinweis auf die Kontraktion der Erde zu entkräften, welche zeitweise die Wirkung der Gezeitenreibung kompensieren konnte.

Fassen wir die Ergebnisse zusammen, so sehen wir wohl, daß die Gezeiten die tektonischen Vorgänge in der Erdkruste in den sogenannten „geologischen Epochen“ nicht ernstlich beeinflussen konnten.

Kapitel 25

Veränderungen der Erdkruste als Folge von Polwanderungen

§ 276. Arten der Polbewegungen. Wir müssen eine ganze Reihe von Arten der Polbewegungen unterscheiden (vgl. Band 1).

a) **Bewegungen der Erdachse + Erde im Raum.** Hierher gehören die Präzession und die Nutation. Eine Bedeutung für unser Problem haben beide nicht.

b) **Polschwankungen.** Im Verlaufe von etwas über 400 Tagen beschreiben die Pole kreisähnliche Bewegungen um eine Mittellage mit wechselnden Amplituden (größter Radius etwa 10 Meter). Die hierbei entstehenden Kräfte (vgl. S. 24 und S. 26) können vielleicht zur Auslösung von Erdbeben beitragen, sie sind aber zu klein, um tektonische Vorgänge hervorzurufen und scheiden daher für uns hier ebenfalls aus.

c) **Polwanderungen.** Als Polwanderungen bezeichnen wir Bewegungen der Pole relativ zu der Erdoberfläche in der Nachbarschaft des Poles. Als Ursache für die Polwanderungen kommen *zwei völlig verschiedene Vorgänge* in Betracht: Entweder kann sich die Erdachse relativ zum Erdkörper verlagern, oder es gleiten mehr oder minder große Teile der Erdkruste — im Grenzfall die ganze Erdkruste — über einen oder beide Pole hinweg. Im zweiten Falle kann es natürlich leicht vorkommen, daß der eine Pol sich völlig anders verlagert als der andere, ja daß der eine sogar in bezug auf seine Umgebung unverändert stillsteht, während sich der andere verlagert.

Die mit diesen Problemen verknüpften Untersuchungen befinden sich noch im Anfangsstadium. Wegen der Einzelheiten sei auf Band 1 (Theorie) und Band 9 (Klimaänderungen) verwiesen¹⁾. Vor allem ist die Frage von Wichtig-

¹⁾ Da beide Bände beim Druck dieses Bandes noch nicht begonnen sind, ist damit zu rechnen, daß dort neuere Untersuchungen mitverwertet sind, so daß gewisse Abweichungen zwischen den Ergebnissen nicht ausgeschlossen sind.

keit, ob beide Vorgänge theoretisch überhaupt möglich sind. Für die *Bewegungen von Teilen der Erdkruste* oder sogar der ganzen Erdkruste über ihre Unterlage im Laufe geologischer Epochen ist dies ziemlich sicher der Fall, da wir ja in einer Tiefe von nicht ganz 100 km mit einem kleinen Fließwiderstand rechnen können, und es lassen sich auch Kräfte angeben, wie wir unten sehen werden, welche große Teile der Erdkruste zu verschieben suchen. Dagegen ist die Frage, ob sich die Erdachse in der Erde verlagern kann, noch offen. Auf der einen Seite fanden SCHWEYDAR und LAMBERT, daß *Achsenverlagerungen in einer starren Erde nicht stattfinden können*, auf der andern Seite stellte SCHIAPARELLI¹⁾ fest, daß *bei Vorhandensein einer gewissen Fließfähigkeit unbegrenzte Achsenverlagerungen möglich* sind. Beide Ergebnisse widersprechen sich nicht, denn im ersten Falle ist eine Deformation der Erde in den neuen Gleichgewichtszustand unmöglich, der Äquatorwulst kann insbesondere nicht die neue Lage einnehmen und verhindert so, worauf A. WEGENER²⁾ aufmerksam gemacht hat, die Verlagerung der Erdachse. Die Ergebnisse über die Fließfähigkeit der Erde sprechen aber dafür, daß die Umorientierung des Äquatorwulstes und damit Verlagerungen der Erdachse möglich sind. Eine mathematische Behandlung dieses Problems ist allerdings noch nicht erfolgt.

Für die Beurteilung des Problems ist es natürlich von Wichtigkeit, daß eine *Verlagerung der Pole* um etwa $3\frac{1}{2}$ m von 1900 bis 1925 möglicherweise vorhanden ist (vgl. S. 445), und zwar verlagert sich der Nordpol anscheinend gegen Grönland. Andererseits wurde von einer großen Reihe von Sternwarten der Nordhalbkugel in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts eine Abnahme der Breite festgestellt (vgl. S. 458), der bei der Lage der Stationen eine Polbewegung in entgegengesetzter Richtung entsprechen würde. Allerdings wird damit gerechnet, daß in beiden Fällen fremde Einflüsse (Bewegungen einzelner Stationen³⁾ im ersten, Refraktionerscheinungen im zweiten) überwiegen.

§ 277. **Folgen von Polbewegungen.** Sowohl die Achsenverlagerungen wie die Krustenverschiebungen — auf die Trennung der Bezeichnungen für die beiden Vorgänge hat mit Recht A. WEGENER entschieden hingewiesen — müssen bei entsprechender Größe Klimaänderungen zur Folge haben, die ihrerseits wieder Veränderungen in all den Erscheinungen zu erkennen geben müssen, die vom Klima abhängen, also etwa in Veränderungen der Tier- und Pflanzenwelt, der Niederschläge, der Beschaffenheit der obersten Schichten des Erdbodens (Wüsten), der Art der Sedimentation, in Verlagerung der Eis- und Gletscherzonen. Daneben treten aber auch in beiden Fällen Massenverlagerungen in der Erdkruste auf, die jedoch in beiden Fällen verschieden sind.

Bei *Krustenverschiebungen* müssen wir bedenken, daß alle Schichten infolge der Abplattung nach den Polen hin dünner werden. Sind a und c die Achsen eines Rotationsellipsoides, so ist dessen Abplattung α definiert durch

$$\alpha = \frac{a - c}{a}, \text{ also ist } a - c = \alpha a \quad (245)$$

Wendet man diese Beziehung auf zwei Niveauellipsoide der Erde an (Indizes 1 und 2) und subtrahiert beide Gleichungen voneinander, so ergibt sich die Differenz D zwischen den Schichtdicken am Äquator und am Pol:

$$D = a_1 \alpha_1 - a_2 \alpha_2 \quad (246)$$

¹⁾ De la rotation de la terre sous l'influence des actions géologiques, St. Petersburg 1889. Vgl. auch W. KOEPPEN, Petermanns Mitt. S. 145 u. 191, 1921; Geolog. Rundschau 12, 314, 1922.

²⁾ Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 4. Aufl., Braunschweig 1929.

³⁾ K. LEDERSTEGE, Gerlands Beitr. z. Geophysik, 26, 314, 1930.

Setzt man etwa $a_2 = a_1 - 50$ km, so ist bei dem Aufbau der Erde, wie wir ihn vermuten, die Differenz der Abplattungen etwa 0,00004, und wir erhalten $D =$ etwa 400 m, d. h., daß bei hydrostatischem Gleichgewicht eine *am Äquator 50 km dicke Krustenschicht an den Polen nur 49,6 km dick* ist. Verschiebt sich eine Kontinentalscholle polwärts, so muß sie immer tiefer in den Unterbau einsinken, verschiebt sie sich äquatorwärts, so muß im Untergrund Material zufließen. Da dies nicht plötzlich geschieht, sondern der Ausgleich etwas nachhinkt, haben wir also auf einer polwärts driftenden Scholle Schwereüberschuß, auf einer äquatorwärts driftenden Scholle Schweredefizit zu erwarten. Das Wasser dagegen kann sich sofort in die Gleichgewichtslage einstellen, es müssen sich also im ersten Falle Regressionen, im zweiten Transgressionen bemerkbar machen.

Bei *Achsenverlagerungen* treten die gleichen Erscheinungen, nur im wesentlichen größeren Maßstabe auf. Bewegt sich die Erdachse etwa von OO nach O_1O_1 (Fig. 5 S. 24), so stellt sich das Wasser sofort in die neue Lage ein (LR in der Figur), während das Land noch eine Lage zwischen dieser und der Ausgangslage einnimmt. Wir haben also analog wie vorher *vor dem Pol, d. h. in dem Gebiet, das sich polwärts zu bewegen scheint, Regression, hinter dem Pol Transgression*. Eine Entscheidung, welcher Vorgang vorliegt, kann also nur die Intensität des Vorganges, nicht dieser selbst liefern.

Bei Krustenverlagerungen muß, wie wir sahen, die treibende Kraft die Reibung zwischen der Scholle und ihrem Untergrunde überwinden sowie die Reibung, welche beim Einsinken oder Aufsteigen der Scholle zwischen dieser und ihrer Unterlage und in dieser selbst durch Ausgleichsströmungen entsteht. Bei Achsenverlagerungen müssen dagegen im ganzen Erdkörper Umlagerungen entstehen, da der „Äquatorwulst“ keine Eigentümlichkeit der obersten Schichten ist, sondern alle Teile der Erde, allerdings in abnehmendem Maße, abgeplattet sind. Immerhin beträgt die Abplattung des Erdkernes in 2900 km Tiefe noch fast 0,003, nach (246) ist also die Differenz der beiden Achsen des Kernellipsoids ($a = 3500$ km) etwa 10 km. Es ist nun eine offene Frage, ob die Verschiebung der Erdkruste über ihrer Unterlage größere Kräfte beansprucht oder die Umlagerung der Massen im ganzen Erdkörper. Welche der beiden Deutungen zutrifft, wenn Anzeichen für Polwanderungen vorliegen, kann also am besten durch die Beantwortung der Frage entschieden werden, ob die treibenden Kräfte nur die Erdkruste zu verschieben oder die Erdachse zu verlagern suchen. In beiden Fällen müssen im übrigen auch erhebliche Verzerrungen in ost-westlicher Richtung eintreten, da der Äquatorumfang etwa 130 km größer ist als der Meridianumfang. Wir müssen also bei polwärts driftenden Kontinenten Stauchungen, bei äquatorwärts driftenden Zerrungen finden, und zwar unter Umständen von erheblichen Dimensionen.

Bevor wir uns nun weiter theoretisch mit diesem Problem befassen, wollen wir einige Theorien betrachten, welche die Beobachtungen zu deuten versuchen, die auf Polwanderungen hinweisen, und Ursachen und Folgen davon zum Gegenstand haben.

§ 278. Die Krustenverschiebungshypothese von KREICHGAUER. Zu den wichtigsten Versuchen, die tektonischen Veränderungen der Erdkruste zu erklären, gehört das Buch von KREICHGAUER, „Die Äquatorfrage in der Geologie“¹⁾, das die Grundlagen für eine ganze Reihe von späteren Theorien enthält. KREICHGAUER war wohl der erste, der in größerem Umfange versuchte, zunächst alle erreichbaren geologischen und geophysikalischen Tatsachen zusammenzutragen

¹⁾ Missionsdruckerei in Steyl, 1902.

und aus ihnen Schlüsse auf die Vorgänge zu ziehen. Er kam hierbei zu dem Ergebnis, daß der Äquator im Laufe der geologischen Epochen über die Erde gewandert sein müsse; er fand auch schon, daß dann zwei Quadranten (vor den Polen in deren Bewegungsrichtung) gepreßt, die beiden andern gedehnt werden müßten, und er suchte dies aus den Beobachtungen der letzten geologischen Vergangenheit zu beweisen. Die Lage des Äquators in den verschiedenen Epochen leitete er einmal aus den Gebirgssystemen ab, und zwar vor allem auf Grund des Gebirgsringes um den Äquator. Darüber, wie dieser entsteht, spricht sich KREICHGAUER nicht ganz klar aus. Er sucht an Hand von

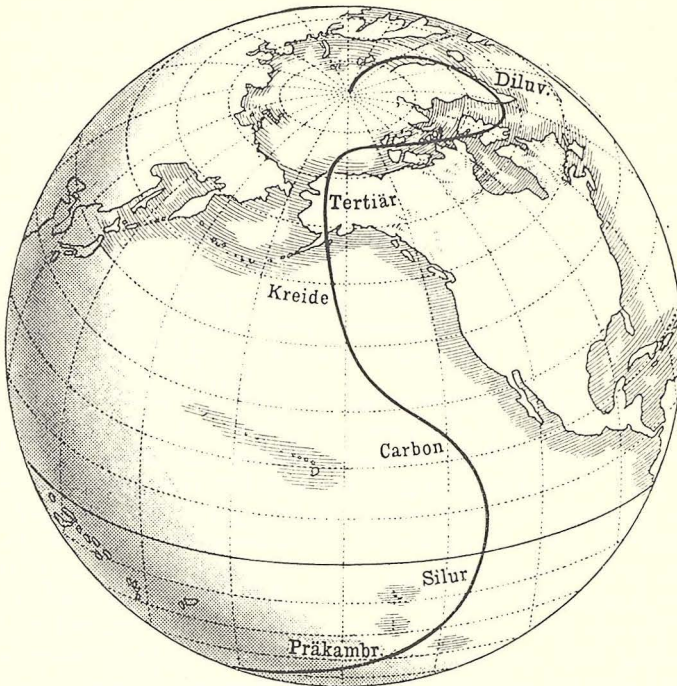


Fig. 181

Bahn des Nordpols in den verschiedenen geologischen Epochen nach KREICHGAUER

Berechnungen und Beobachtungen zu beweisen, daß sich am Äquator eine Mulde gebildet hat, über deren Entstehung er allerdings nichts aussagen kann, die einen Schub der beiden Erdrindenhälften erzeugt. Andererseits erfordert die Kontraktion der Erde, die er ebenfalls voraussetzt, daß sich nicht nur der Äquator, sondern auch ein Meridian verkürzt. Es entstehen so zwei Faltungssysteme, ein äquatorialer „Ring“ und ein meridionaler „Strich“.

Diese beiden Systeme verfolgt KREICHGAUER durch die geologischen Epochen, und findet daraus einen ersten Anhaltspunkt für die Pollage. Weiter untersucht KREICHGAUER die Richtung der schiebenden Kraft, d. h. die Lage der Gebiete, die in den einzelnen Epochen gedehnt und gepreßt wurden. Dabei geht er im Prinzip von der „Polfluchtkraft“ (vgl. S. 12) aus. Er untersucht dann weiter Gebiete mit Regressionen und Transgressionen, die Lage der Gebiete mit rotem Sandstein (als Zeichen für warmes Klima), und schließlich die Verteilung der Organismen und der Eisspuren. Als Endergebnis erhält er dann die in Figur 181 dargestellte Polbahn. Wie aus unserer kurzen Darstellung

bereits hervorgeht, ist die Hypothese von KREICHGAUER empirisch entstanden. Die Deutung der Vorgänge ist offenbar erst nachträglich versucht worden und daher nicht immer klar, zum Teil wird eine solche überhaupt nicht gegeben, etwa bei der Betrachtung der „äquatorialen Mulde“.

§ 279. Die Pendulationstheorie von SIMROTH¹⁾. Ausgehend von einer von P. REIBISCH²⁾ aufgestellten Hypothese, wonach die Erde Schwingungen (Pendulationen) um eine Mittellage ausführt, suchte SIMROTH Regressionen und Transgressionen und hieraus wieder Tierwanderungen zu erklären. Diesem Zweck entsprechend beschäftigte er sich in erster Linie mit der Verbreitung und der Wanderung von solchen, und nur verhältnismäßig kurz mit der eigentlichen Theorie. Nach ihr sollen die Pendulationen in abnehmendem Maße um eine Achse erfolgen, die etwa durch Java und den Schnittpunkt der Westküste von Südamerika mit dem Äquator geht, im übrigen aber selbst etwas schwankt. Auf diese Weise suchte er auch die Eiszeiten und die wechselnde Vulkantätigkeit zu erklären.

Als Ursache für die Pendulationen nahm SIMROTH zuerst den Aufsturz eines Weltkörpers auf die Erde an, später Einwirkungen des Sonnenmagnetismus auf den Erdmagnetismus. Daß beide Ursachen aber nicht die von SIMROTH angegebenen Folgen haben, hat u. a. NÖLKE (a. a. O. S. 60) gezeigt. Auch die übrigen physikalischen Darstellungen von SIMROTH geben zu Einwänden Anlaß, so daß wohl kaum ein Grund zugunsten dieser Theorie spricht.

Ähnliche Gedanken vertrat dann noch K. SCHNEIDER³⁾.

§ 280. Die Polwanderungen nach KOEPPEN-WEGENER. Weitaus die umfangreichste allgemeine Untersuchung der Frage, ob die Verlagerungen der Pole relativ zur Erdoberfläche stattgefunden haben, rührt von KÖPPEN und WEGENER⁴⁾ her. Sie berücksichtigen die Lage der Eisspuren, von Kohlelagerstätten, Trockengebieten, Gips- und Steinsalzvorkommen, Wüsten und Lößgebieten, Verbreitung von Tieren und Pflanzen; überdies untersuchte A. WEGENER noch die Lage der Schwerestörungen sowie die Gebiete mit Trans- und Regressionen. Das Ergebnis lautet, daß Verlagerungen der Pole eine wesentliche, jedoch nicht die einzige Ursache für all die Erscheinungen⁵⁾ sein können, welche festgestellt wurden (vgl. Fig. 182), und daß die Bewegungen der Pole in erster Annäherung durch die Figuren 158 und 159 S. 446 wiedergegeben werden. Ein Vergleich mit Figur 181 zeigt, daß, abgesehen von den ältesten Epochen, in wesentlichen Teilen auch Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von KREICHGAUER und den oben wiedergegebenen Polbahnen besteht.

Auf zwei Dinge sei aber hier noch besonders hingewiesen: Zunächst auf die Frage der *Eiszeiten*. Einmal gibt es in der älteren Erdgeschichte mehrfach Hinweise dafür, daß größere Gebiete der Südhalbkugel von Eis bedeckt waren, während gleichzeitig auf jetzt weit nördlich gelegenen Zonen der Nordhalbkugel tropisches oder subtropisches Klima herrschte. In diesem Falle kann man die

¹⁾ Leipzig 1907, 2. Aufl., Berlin 1914.

²⁾ Ein Gestaltungsprinzip der Erde. 27. Jahresber. Ver. f. Erdk. zu Dresden 1901, S. 105. II ebenda 1905, S. 39.

³⁾ Geologische Rundschau 8, 1917.

⁴⁾ Die Klimate der geologischen Vorzeit, Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin 1924. Vgl. auch A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 4. Aufl., Verlag Vieweg, Braunschweig 1929.

⁵⁾ Eine kritische Darstellung der Beobachtungen für die verschiedenen geologischen Epochen erfolgt in Band 2, während in Band 9 das Klimaproblem als solches dargestellt werden soll.

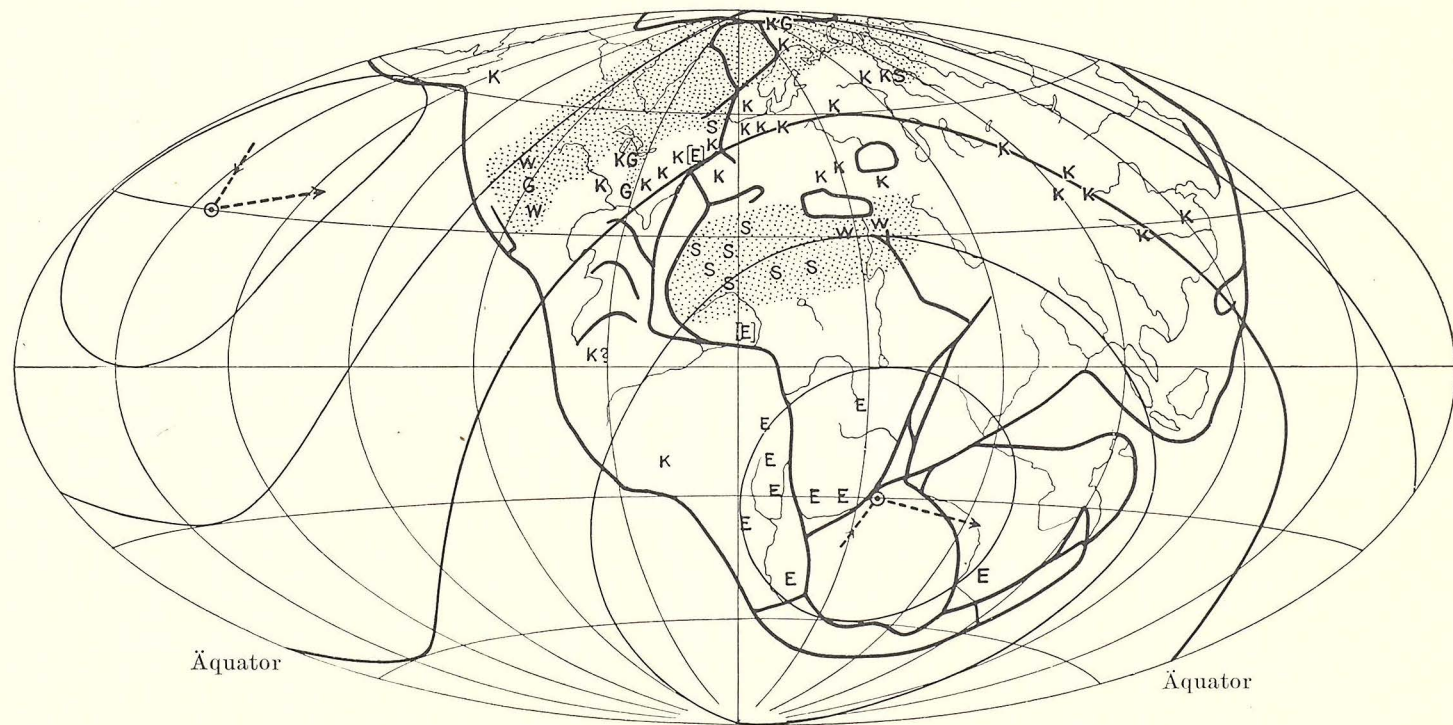


Fig. 182

Eis, Moore und Wüsten in der Karbonzeit nach KOEPPEN-WEGENER. E = Eisspuren, K = Kohle, G = Gips, W = Wüstensandstein. Punktierte Räume: Trockengebiete. Gestrichelt: Die Polbahn (Aus: Klimate der geologischen Vorzeit)

Annahme, daß damals der Pol wesentlich anders gelegen habe, kaum umgehen. Dann kennen wir aber aus den letzten geologischen Epochen auf der Nordhalbkugel viel kürzere Perioden von Vergletscherung, die mit wärmeren Perioden abwechselten (Interglazialzeiten), während auf der Südhalbkugel, zum Teil zu etwas anderen Zeitpunkten, ähnliche Vorgänge stattfanden, jedenfalls aber keine wesentliche Änderung des Klimas erfolgte, wie im oben erwähnten Falle. Bei diesen Erscheinungen spielen Polwanderungen eine sekundäre Rolle; die Hauptursache dieser relativ kurzen Eiszeiten ist wahrscheinlich in Änderungen der Ekliptikschiefe und der Exzentrizität der Erdbahn zu suchen. (Eine eingehendere Darstellung dieser Probleme erfolgt in Band 9). Wir müssen jedenfalls damit rechnen, daß in diesem Falle derartige Eis- und Interglazialzeiten zu allen geologischen Epochen vorgekommen sind.

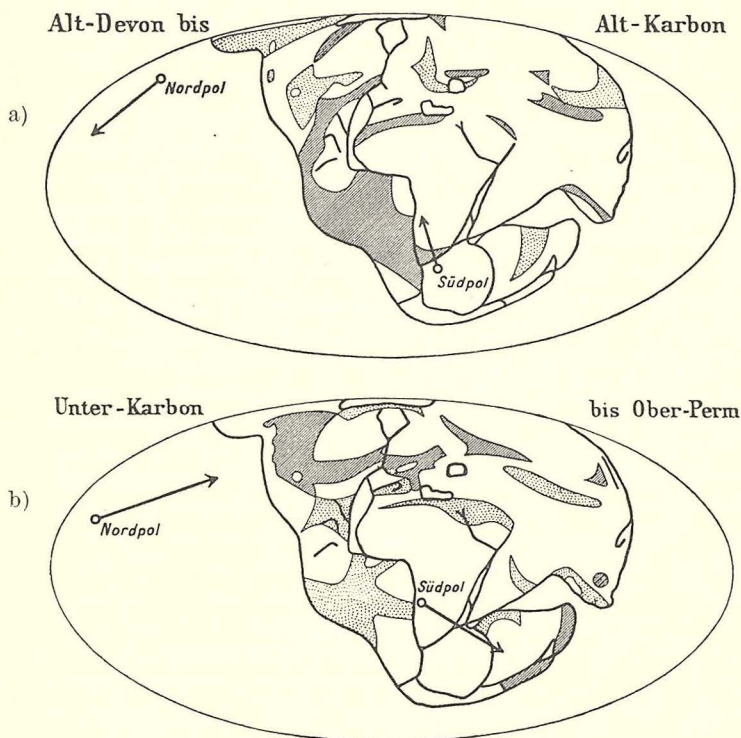


Fig. 183

Transgressionen (punktiert) und Regressionen (schraffiert) a) zwischen Früh-Devon und Früh-Karbon, b) zwischen Früh-Karbon und Spät-Perm mit zugehörigen Polbahnen nach A. WEGENER
Aus „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“

Der zweite Hinweis bezieht sich auf die *Darstellung der Polwanderungen* (vgl. S. 445). Bewegt sich die Erdkruste als Ganzes, so beschreiben beide Pole gleiche Bahnen und diese sind im übrigen gleich, auf welchen Punkt der Erde man auch die Polbahn bezieht. Das gleiche gilt für Achsenverlagerungen. Anders wird aber das Ergebnis, wenn sich die einzelnen Teile der Erde noch gegeneinander verschieben, wie es bei der WEGENERSchen Theorie der Fall ist. Zunächst ändert sich dann die Lage der einzelnen Klimateugnisse zueinander; wir werden darauf

S. 529 zurückkommen. Dann aber ist es denkbar, daß der eine Pol in seiner Lage zu einer bestimmten Stelle der Erdkruste liegenbleibt, sich relativ zu anderen Stellen ganz verschiedenartig verschiebt, während der andere Pol wieder andere scheinbare Bewegungen ausführt. Man muß dann entweder die Bahn des Poles in bezug auf einen bestimmten Punkt der Erdkruste angeben, wie es WEGENER tut (Fig. 158, S. 447) oder man muß versuchen, die Bewegung der einzelnen Teile der Erdkruste festzustellen und dann die wahre Polbahn abzuleiten. Handelt es sich dabei nur um Krustenwanderungen, so darf sich keine Polbahn ergeben in bezug auf den Erdkörper. Ein solcher Versuch, der allein die Entscheidung liefern würde, ist zurzeit noch kaum durchführbar.

WEGENER vertritt den Standpunkt, daß gleichzeitig Krustenbewegungen stattfinden („Kontinentalverschiebung“, vgl. S. 526) und Achsenverlagerungen, und zwar stützt er sich dabei auf die Tatsache, daß vor dem Pol im allgemeinen Regressionen, hinter ihm Transgressionen festgestellt werden (Fig. 183). Wir haben aber bereits S. 514 gesehen, daß diese Erscheinung bei Krustenwanderungen qualitativ gerade so zu erwarten ist. Überdies vermutet WEGENER, daß die Polbewegungen mit den Kontinentverschiebungen zusammenhängen, letztere sind aber zweifellos nur Vorgänge in der Erdkruste, so daß dieses Argument für Krustenverlagerungen spricht.

§ 281. Die Krustenverschiebung nach GUTENBERG. Während A. WEGENER die Polwanderungen durch Verlagerungen der Erdachse zu erklären suchte, ohne daß er allerdings Kräfte hierfür angab, stellte sich B. GUTENBERG¹⁾ auf den schon vorher von KREICHGAUER und anderen eingenommenen Standpunkt, daß es sich um Verschiebungen der Erdkruste über ihrer Unterlage handelt, die allerdings nicht so vorzustellen sind, daß es sich um einen Vorgang handelt, wie beim Verschieben zweier Bretter gegeneinander, sondern um ein langsames Fließen der Schichten, das von Unterströmungen begleitet ist. Dabei geht noch eine ganze Reihe von anderen Bewegungen vor sich, auf die wir in § 284 zurückkommen werden.

Nach GUTENBERG lag im Karbon der größte Teil der Kontinentalscholle, zu der er auch den Atlantischen und Indischen Ozean zählt, südlich des Äquators (Fig. 184a). In den folgenden Epochen wanderte die ganze Scholle unter Ausbreitung im wesentlichen nordwärts, bis sie heute etwa vom Äquator halbiert wird (Fig. 184d). Dabei dehnte sie sich aus, da die Schwere eine gleichmäßige Ausdehnung der kontinentalen Kruste über die ganze Erde zu bewirken sucht. Eine solche ist wohl ursprünglich vorhanden gewesen, bei der Loslösung des Mondes von der Erde (vgl. S. 475) aber gestört worden, da der Mond an der Ablösungsstelle die Kruste mitgenommen hat. Die Kraft, welche nach GUTENBERGS Ansicht die *Krustenwanderung* bewirkt hat, ist in erster Linie die Polfluchtkraft, welche so lange einen Kontinent als Ganzes zu verschieben sucht, bis er symmetrisch zum Äquator liegt. Auf die dann noch innerhalb des Kontinentes durch die Polflucht bewirkten Spannungen kommen wir im nächsten Kapitel zurück. Auch nachdem der ganze Block symmetrisch zum Äquator liegt, treten immer noch kleinere Krustenwanderungen auf, da durch die übrigen Kräfte (Chemische, Schrumpfung, Polflucht innerhalb der Kontinente, Erosion, Sedimentation) Verschiebungen der Massen verursacht werden. Dabei treten nicht nur reine Verschiebungen auf, wie man leicht aus den Bildern schließen kann, sondern auch Drehbewegungen der Scholle.

¹⁾ Die Fließbewegungen der Kontinentalscholle, Gerlands Beitr. z. Geophysik 16, 239, 1927, und 18, 281, 1927.

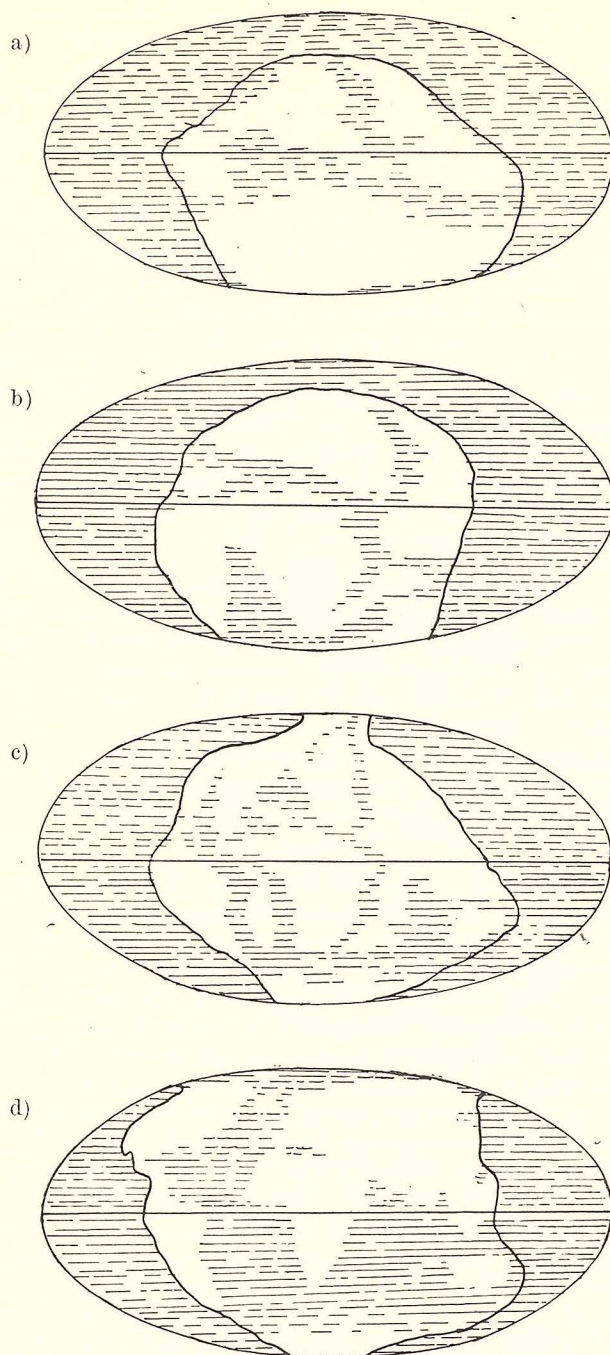


Fig. 184

Sialscholle (Rand ausgezogen) in verschiedenen geologischen Epochen.
 a) Karbon, b) Kreide, c) Eozän, d) Jetztzeit. Die Skizzen stellen die
 ganze Erdoberfläche dar. Schraffiert: Meere

Die Einzelheiten der „scheinbaren Polbewegung“ stimmen mit den von A. WEGENER gefundenen im wesentlichen überein. Die von diesem für die Trans- und Regressionen gefundenen Beziehungen zur Polbewegung (z. B. Fig. 183) können daher ohne weiteres auch auf unsere Hypothese angewandt werden, denn wir sahen ja (S. 514), daß sich die Ergebnisse in beiden Fällen nur quantitativ unterscheiden.

Mit der Krustenwanderung sind nach der Theorie (S. 514) Stauchungen und Dehnungen verbunden. Geht etwa ein Meridian durch Drehung der Kontinentalmasse um dessen Achse um 90° in den Äquator über, so dehnt sich der entsprechende Oberflächenumfang um rund 70 km, also einen *Betrag, der der Größenordnung nach mit der Schrumpfung vergleichbar ist*. Natürlich erfolgt gleichzeitig an dem ursprünglichen Äquator eine entsprechende Schrumpfung. Ferner erzeugt die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit Spannungen (vgl. S. 514). Es ist daher kein Wunder, daß die Zeiten der großen Krustenverschiebungen im Karbon-Perm (Fig. 158) und im Tertiär mit den Zeiten besonders starker Gebirgsbildung zusammenfallen, während beide vom Perm bis zur Kreide relativ klein waren.

Auch heute haben wir geringe Krustenbewegungen und geringe Gebirgsbildung. Die scheinbare Polwanderung betrug von 1900 bis 1925 höchstens (vgl. S. 513) 14 cm pro Jahr, das ist allerdings bei gleichmäßiger Andauer immer noch mehr als etwa im Mesozoikum im Mittel.

Leider war es bisher nicht möglich, die Polbewegung bzw. die Krustenbewegung über das Karbon zurückzuverfolgen, da sich dann unter allen Annahmen Widersprüche ergeben, die wohl zum Teil durch die Unsicherheit bedingt sind, mit der jene alten Klimazeugnisse in die geologische Zeitrechnung eingeordnet werden können. Eine Extrapolation aus unserer Darstellung S. 519 spricht vielleicht in dem Sinne, daß ursprünglich die ganze Kontinentalmasse noch stärker auf der Südhalbkugel konzentriert war, wobei möglicherweise Amerika dem Südpol näher lag und durch eine Drehung der Scholle in die in Figur 182a gezeichnete Lage gelangte. Die Ursache für derartige Drehungen kann in dem verschiedenen Widerstand der einzelnen Schollenteile gegen Bewegungen gesucht werden, wodurch ein Drehmoment erzeugt wird.

Kapitel 26

Kontinentaldrift-Hypothesen

§ 282. Allgemeines. Schon relativ frühzeitig stellte man fest, daß der eurasische Gebirgsbau (Fig. 185) den Eindruck erweckt, als ob die Gebirgsketten durch Pressung entstanden seien. Der erste, welcher diesen Gedanken aussprach, war wohl E. SUSS. Auf Grund seiner besonders eingehenden Studien schloß er, daß der Himalaya durch einen südwärts gerichteten Druck des nördlichen Asiens entstanden sei, während die ostasiatischen Gebirgsbögen ihren Ursprung einem gegen den Pazifik gerichteten Schub verdanken. Einen Schritt weiter ging F. B. TAYLOR¹⁾. Die von ihm vermuteten Schubkräfte sind in Fig. 186 besser als durch Beschreibung zu erkennen. Als Hauptmoment führte TAYLOR die „Polflucht“ der Kontinente ein, ohne die Kraft genauer zu kennen, welche diese bewirkt. Eine große Zahl von späteren Theorien, z. B. die von KREICH-

¹⁾ Bull. Geolog. Soc. of America 21, 179, 1910.

GAUER, der zuerst auf die theoretische Polfluchtkraft hinwies, von WEGENER, GUTENBERG, STAUB u.a. sahen in der Polfluchtkraft einen wesentlichen Faktor zur Erklärung der Gebirgsbildung, so daß wir uns nunmehr einmal mit der Wirkungsweise dieser und auch der Westdriftkräfte befassen wollen.

Bei den *Polfluchtkräften* haben wir (vgl. S. 12 ff.) Kräfte vor uns, welche in den Kontinenten infolge der verschiedenen Form der Niveaulächen entstehen. Ihr Maximum liegt in $\pm 45^\circ$, am Pol und Äquator sind sie Null, ihre Richtung ist überall äquatorwärts. Einen über den Äquator ausgedehnten Kontinent suchen sie in der Nähe des Äquators aufzustauchen, ähnlich pressen sie zwei Kontinente, die sich äquatorwärts erstrecken, zusammen, schließlich

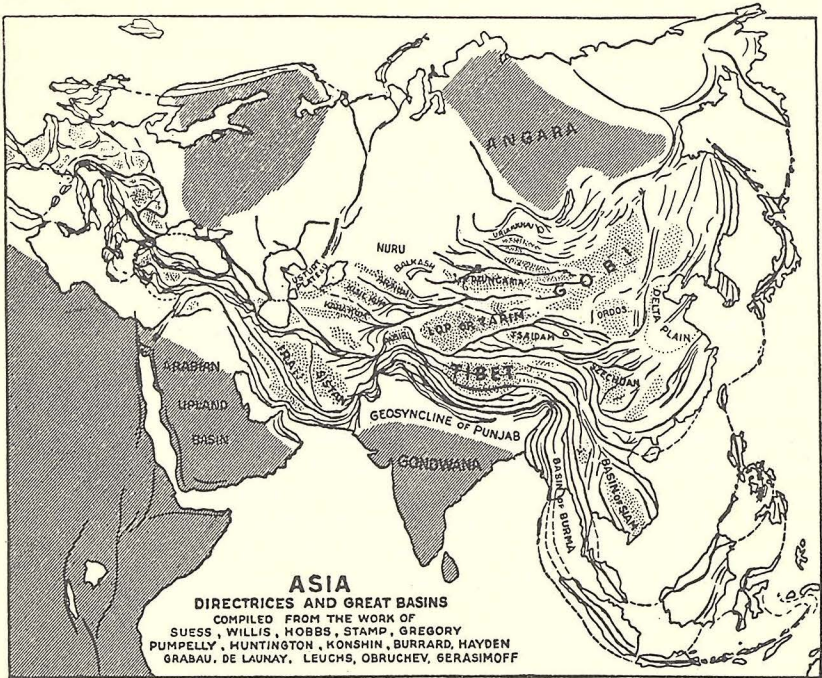


Fig. 185

Die Gebirgsketten in Asien nach BERKEY und MORRIS
(Aus R. A. DALY, Our mobile Earth)

suchen sie einen Kontinent oder einen zusammengepreßten Block von Kontinenten so zu verschieben oder zu drehen, daß das Integral über die ganzen Polfluchtkräfte Null wird, d. h. in erster Annäherung, daß nördlich und südlich des Äquators das Integral über Masse $\times \sin 2\varphi$ je den gleichen Wert besitzt. Dabei ist unter Kontinent nicht nur der über Meeressniveau liegende Teil zu verstehen, sondern jeder Teil der Erdkruste, der in das schwerere Sima eingebettet ist, nach den Ergebnissen der Seismik (vgl. S. 453) also auch der Boden des Atlantischen und des Indischen Ozeans. Entsprechend der letzteren Erwägung würden also Krustenbewegungen eintreten müssen, wie wir sie im vorigen Kapitel im Prinzip bereits erörterten. Hier interessieren uns nun zunächst die Wirkungen innerhalb der Kontinente.

Die Polfluchtkräfte drücken, wie wir sahen, mit einer Kraft, die maximal etwa dem Druck einer Gesteinssäule von 25 m Höhe auf ihre Unterlage ent-

spricht, die beiden nördlich und südlich des Äquators gelegenen Teile eines Kontinentes oder zwei entsprechend gelagerte Kontinente gegeneinander. Im allgemeinen genügt dieser Druck zweifellos nicht, um irgendeine Veränderung hervorzurufen, es müssen lediglich besonders hohe Spannungen in der Äquatorialzone auftreten. Nun besitzen wir in den Erdbeben ein vorzügliches Anzeichen für Spannungen; aus unseren Betrachtungen müßte also folgen, daß in der Äquatorzone eine starke Anhäufung von Erdbeben eintritt. Dies ist nun nach Untersuchungen von CH. MAURIN¹⁾ in der Tat der Fall, wie Tabelle 59 zeigt.

Tabelle 59

Zahl der Erdbeben in verschiedenen Breiten pro 10 Millionen Quadrat-kilometer a) nach 542 Erdbeben 1914—1920, b) nach 1551 Beben 1903—1910 und 1914—1920 nach Maurin

Breite in Graden	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90
a)	18,5	16,5	10,4	10,6	8,9	3,0	0,6	0,9	0,0
b)	50,8	38,3	30,4	35,4	24,1	17,1	5,6	3,9	1,3

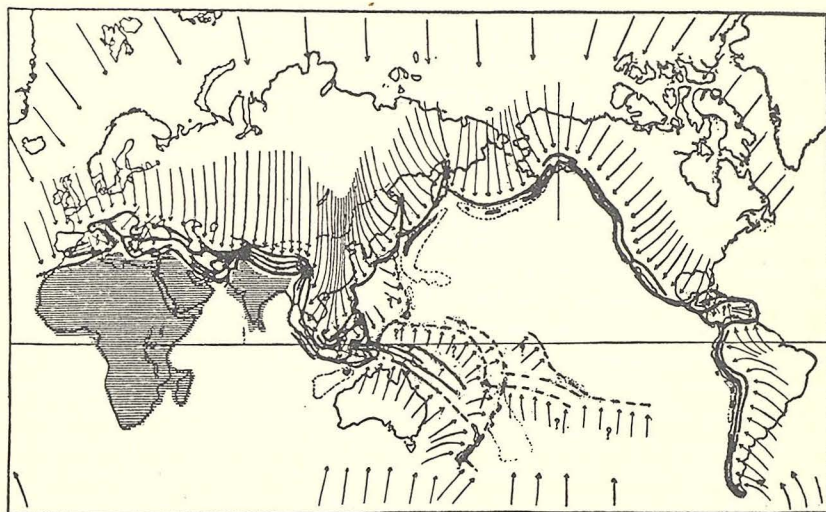


Fig. 186

Schubkräfte, Bewegung der Kontinente und entsprechende Gebirgsbildung nach TAYLOR. (Aus R. A. DALY, Our mobile Earth)

MAURIN benutzte hierzu 542 Erdbeben 1914 bis 1920 nach dem „International Seismological Summary“ und 1009 Erdbeben von 1903 bis 1910 nach Listen von MILNE. Die Angaben sind auf gleiche Gebietsgröße reduziert. Der Gang ist ganz auffällig. Er kann zum Teil durch die Tatsache erklärt werden, daß in der Nähe der Polargebiete wenig Erdbebenwarten liegen, doch ist dies zweifellos nicht die einzige Ursache, da nur nach der Lage der Überzahl der Erdbebenwarten in mittleren nördlichen Breiten dort eine starke Zunahme zu erwarten wäre, die in der Tabelle zwar angedeutet ist, bei weitem aber nicht die Zahl der Beben in der kaum mit Erdbebenwarten besetzten Äquatorialzone erreicht. Im all-

¹⁾ Comptes rendus Académie Paris 184, 612, 1927.

gemeinen steht also die Äquatorzone unter erhöhter Spannung, die mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Polfluchtkräfte erzeugt wird. Befindet sich nun in der Nähe des Äquators eine schwache Zone, insbesondere eine ost-westlich gerichtete Geosynklinale, so kann diese durch die Polflucht erzeugte Druckkraft gemeinsam mit den Schrumpfkraften bewirken, daß der Fließwiderstand an der schwächsten Stelle überwunden und das Material der Geosynklinale ausgepreßt wird; dabei bildet sich aber nicht nur eine Aufwölbung nach oben, sondern auch in viel größerem Maße nach unten analog wie es bereits S. 464 dargestellt wurde. Im Untergrunde treten zum Ausgleich Unterströmungen ein. Während sich aber die Energie der Schrumpfkraften im Laufe des Vorganges mehr oder minder aufzehrt, wirken die Polfluchtkräfte unvermindert fort, der nun einmal eingeleitete Bewegungsvorgang bleibt in Tätigkeit, so lange mobiles Material vorhanden ist, da durch das Einsinken der nach unten ausgepreßten Teile der Geosynklinale das isostatische Gleichgewicht angenähert gewahrt bleibt. Natürlich erfolgt die Bewegung nicht dauernd, sondern kurze Epochen mit ruckweisen Veränderungen wechseln mit langsamen Fließvorgängen ab, durch die sich das gestörte Gleichgewicht wieder nach und nach herzustellen versucht. Dabei erhöhen die Unterströmungen die Mobilität der Nachbargebiete sowohl seitlich wie vor und hinter der gestörten Stelle, die natürlich von Anfang an schon einen recht großen Umfang hatte; die Gebirgsbildung ergreift einen immer größeren Raum, bis schließlich alle im Bereich der Geosynklinale in der Nachbarschaft des Äquators vorhandenen mobilen Zonen nach unten und in entsprechend geringerem Maße auch nach oben aufgefaltet sind und sich dabei verfestigt haben.

Der *Endzustand* unterscheidet sich dadurch von dem Anfangszustand, daß leichteres Material äquatorwärts gewandert ist, dafür im Untergrund schwereres Material polwärts. Die Schrumpfungsspannungen haben sich im wesentlichen ausgeglichen, die Polfluchtkräfte dauern dagegen nur wenig vermindert an. Sie genügen aber nun wieder nicht mehr, um Bewegungen innerhalb der Scholle einzuleiten, da diese keine größeren mobilen Zonen in Äquatornähe mehr aufweist, und außerdem die Schrumpfkraften nicht mehr den Anstoß zur Bewegung geben können. Im Laufe der folgenden epirogenen Epoche wachsen letztere wieder an, gleichzeitig bilden sich neue Geosynklinale, zumal in den neu entstandenen Gebirgen die Abtragung besonders groß sein wird, und dadurch auch die Sedimentation in der Nachbarschaft zunimmt (vgl. hierzu S. 543). Es bildet sich so ein dem Ausgangszustand ähnlicher heraus, er unterscheidet sich aber von ersterem dadurch, daß inzwischen normalerweise der ganze Kontinentalblock gewandert ist, wie wir im vorigen Kapitel sahen, daß sich also der Äquator verlagert hat, so daß der Ausgleich nunmehr an einer anderen Stelle erfolgen wird. Vergleicht man nun die Lage nichtpazifischer Gebirgszonen — auf die pazifischen kommen wir später zurück — in den verschiedenen geologischen Epochen mit der zugehörigen Äquatorlage (Fig. 201 S. 545), so findet man in der Tat, daß beide recht gut übereinstimmen; wir haben hier eine nachträgliche Bestätigung für den von KREICHGAUER (S. 515) vorausgesetzten äquatorialen Gebirgsring. Umgekehrt bilden seine Ergebnisse eine Bestätigung dafür, daß die Grundzüge der Theorie zutreffen.

Im ersten Augenblick scheint manchem die Tatsache, daß sich die leichteren Massen am Äquator anzuheften suchen, etwas befremdlich. Man darf dabei jedoch nicht übersehen, daß nicht allein die Zentrifugalkraft wirksam ist, die allerdings schwere Substanzen außen anzuordnen bestrebt ist, sondern auch die Schwere, welche die spezifisch schwersten Teile der Erdkruste am nächsten dem Erdmittelpunkt, innerhalb der Niveauflächen also an den Polen, anzu-

ordnen sucht. Der Endzustand, in dem völliges Gleichgewicht herrscht, ist dadurch definiert, daß sich alle Massen ihrem spezifischen Gewicht entsprechend auf Niveaulflächen anordnen¹⁾. Die ganzen Schollen suchen also gegen den Ozean, insbesondere gegen den Pazifischen, auseinanderzufließen (vgl. Fig. 182). Unter der allgemeinen Wirkung dieses Vorganges sowie der Drift der ganzen Scholle, welche den Druck des Schollenrandes an den Küsten des Pazifischen Ozeans gegen den Ozeanboden verstärkt, türmen sich dort die hohen Gebirgsketten auf, die sich ganz analog wie in den seither betrachteten Fällen (vgl. insbesondere auch S. 464 ff.) in noch höherem Maße auch nach unten erstrecken müssen. Nach allem, was wir über den Boden des Pazifik wissen, ist dieser weniger kompressibel und gegen elastische Formveränderungen unnachgiebiger als die Kontinente. Wir werden also kaum fehlgehen, wenn wir annehmen, daß auch seine Fließfähigkeit (Viskosität) geringer, sein Fließwiderstand (strength)²⁾ größer ist.

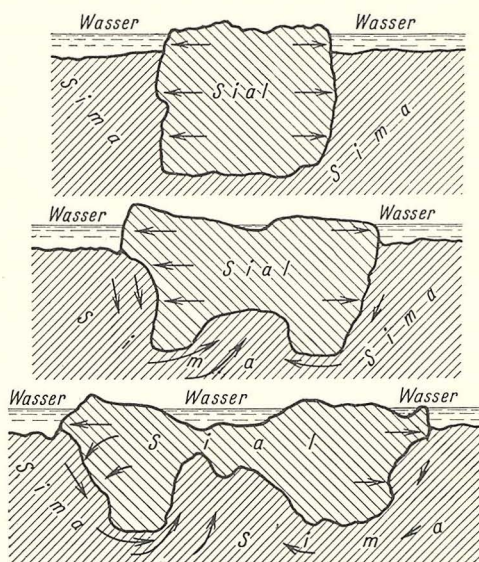


Fig. 187
Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Ausbreitung der Kontinentalscholle. Die Höhen sind stark übertrieben

Die vordringenden Kontinente wälzen sich ganz langsam über den Meeresboden, dieser sinkt ein (Fig. 187), im Untergrund bilden sich entgegengesetzte Unterströmungen aus, und der Kontinent breitet sich langsam aus. Als Beleg für die Richtigkeit dieser Ansicht können die vulkanischen Ergebnisse aus den Gebieten der Pazifikumrandung angeführt werden, welche im Falle Amerikas zeigen²⁾, daß Anzeichen vulkanischer Tätigkeit nur westwärts der heute tätigen Vulkane, nicht aber kontinenteinwärts zu finden sind, während ganz Analoges

¹⁾ Die Polfluchtkraft sucht u. a. zu bewirken, daß eine „Abplattung“ der kontinentalen Kruste entsteht, d. h. daß diese am Äquator dicker ist als an den Polen. In diesem Sinne ist auch die Tendenz zur Bildung einer einige Zehner von Metern hohen Schwelle (Wulst) am Äquator zu verstehen. Bei völliger Bedeckung der Erde mit einer kontinentalen Kruste müßte diese am Äquator um da dicker sein (d = Gesamtdicke, a = Abplattung; vgl. S. 513) als an den Polen. Natürlich könnte auch ein schmales Gebirge mit wesentlich größerer Höhe den Polfluchtkräften das Gleichgewicht halten.

²⁾ Vgl. STEINMANN, Orogen und Magma. Vortrag Geolog. Vereinigung. Jan. 1928.

auch für die Vulkanzonen der Westküsten, also insbesondere Japans, zu gelten scheint¹⁾).

Natürlich finden alle diese Bewegungen nicht streng in den angegebenen Richtungen statt, sondern Hindernisse verschiedener Art bewirken lokale Abweichungen, die Krustenwanderungen und -drehungen überlagern sich den anderen Bewegungen und machen sich besonders an den Kontinentalrändern geltend.

Wenn auch die vorstehenden Ansichten zum Teil speziell von GUTENBERG für dessen Fließtheorie entwickelt wurden, so gelten sie doch zum Teil auch für die anderen Drifttheorien, von denen wir einige in den folgenden Paragraphen skizzieren wollen.

§ 283. Die Verschiebungstheorie von A. WEGENER. Bereits im Jahre 1911 schloß A. WEGENER aus der Ähnlichkeit der Konturen von Europa-Afrika und Amerika sowie auf Grund von paläontologischen Ergebnissen über Landverbindungen zwischen beiden, daß sie ursprünglich eine Einheit gebildet und sich später getrennt hatten. In den folgenden Jahren arbeitete er diese Ansicht dann weiter aus²⁾, und heute ist die WEGENERSche Theorie wohl diejenige geotektonische Ansicht, für welche das umfangreichste Beobachtungsmaterial zusammengetragen ist, die dadurch aber auch andererseits zu einer ausgiebigen Literatur und Untersuchung von Problemen Anlaß gegeben hat, die zu unserem Thema in Beziehung stehen.

Auf Grund seines Studiums über die Landverbindungen in früheren geologischen Epochen kam A. WEGENER zu dem Ergebnis, daß die Kontinente ursprünglich einen großen Block bildeten, der im Laufe der Zeit zerriß und so auseinanderdriftete, wie es Figur 188 zeigt.

WEGENER brachte, wie erwähnt, eine große Anzahl von Argumenten für seine Ansicht zusammen. So sprechen die S. 458ff. angegebenen Ergebnisse über die Bewegungen der einzelnen Erdteile gegeneinander dafür, daß die Kontinente Bewegungen gegeneinander ausführen; die Verteilung der verschiedenen Höhenstufen (S. 450) deutet WEGENER so, daß die eine vorherrschende Höhenstufe dem Niveau der Kontinente, die andere dem Niveau der Ozeanböden entspricht. Dabei hat die Verschiebungstheorie einen entschiedenen Vorzug gegenüber den sogenannten „Brückentheorien“; diese suchen die früheren Verbindungen der Kontinente miteinander, die nach den Ergebnissen über Tierwanderungen angenommen werden müssen (vgl. S. 444), durch die Annahme zu erklären, daß die an den betreffenden Stellen früher vorhandenen Kontinente in die Tiefe gesunken sind. Nach der WEGENERSchen Theorie driftet der Kontinent ab, zum Ausgleich strömt im Untergrund Sima nach, das isostatische Gleichgewicht bleibt gewahrt. Nach den Brückentheorien versinkt der Kontinent, im Untergrund strömt die entsprechende Menge Sima ab, in dem betreffenden Raum vermindert sich das Gewicht der Gesteinssäule, in Nachbarräumen nimmt es zu, das isostatische Gleichgewicht ist gestört. Es müßten also über den Gebieten, in denen „Brücken“ abgesunken sind, Schweredefizite vorhanden sein, während die Beobachtungen keine solche ergeben.

¹⁾ Nach mündlicher Mitteilung von L. A. DAY. Vgl. auch die Ansicht von E. SUSS.

²⁾ A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente, Petermanns Mitt. S. 185, 253, 305, 1912; Geolog. Rundschau 3, 276, 1912; Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, Braunschweig 1915; 2. Aufl. 1920; 3. Aufl. 1922; 4. Aufl. 1929; darin zahlreiche weitere Literaturangaben; Theory of Continental Drift, a symposium, London 1928, Publ. by the American Assoc. of Petroleum Geologists.

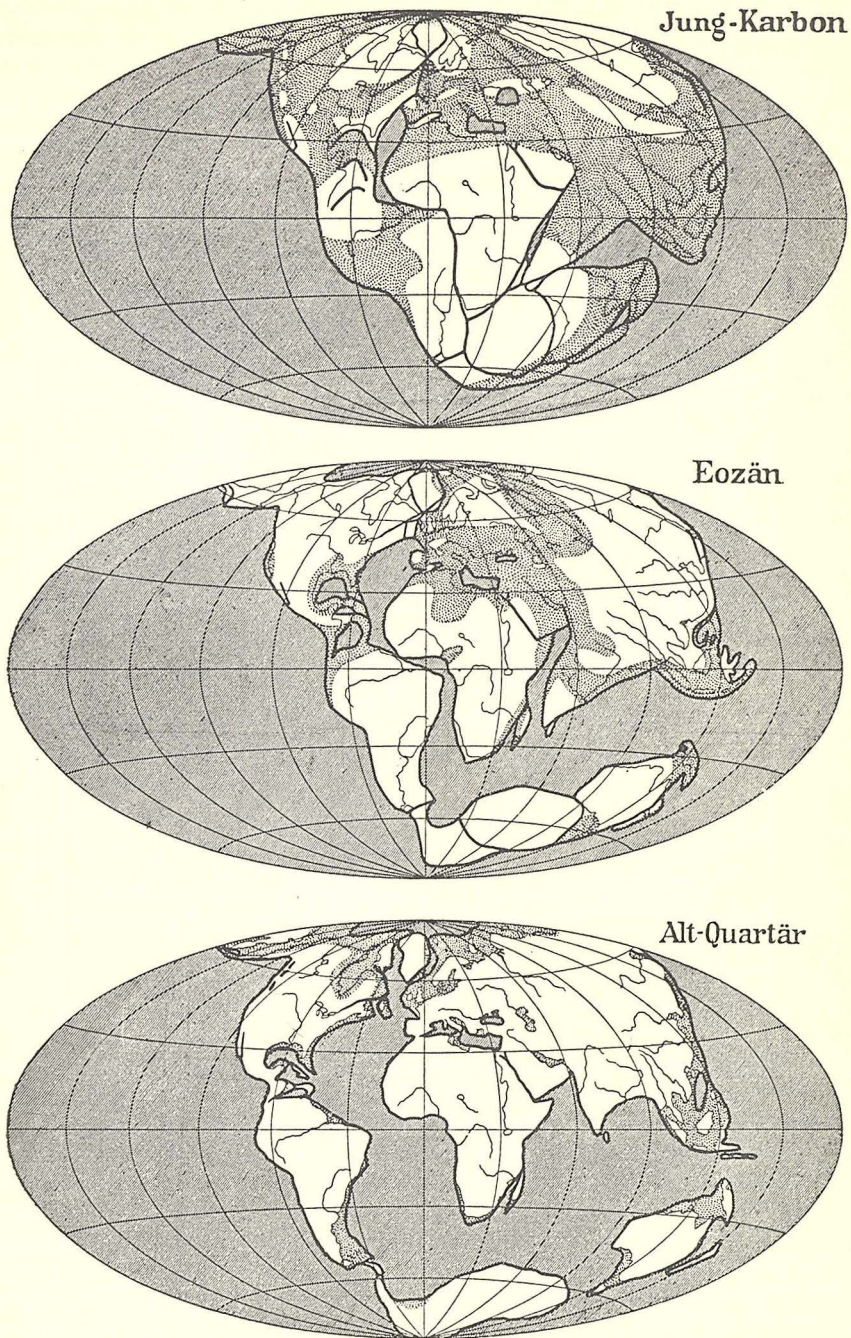


Fig. 188

Die Kontinentaldrift nach A. WEGENER. Punktiert: Flachsee

Auch der geologische Vergleich zwischen Afrika-Europa und Amerika zeigt viele Ähnlichkeiten (vgl. Fig. 189), wenn auch hier manche Frage noch zu klären bleibt. Immerhin wird auch hierdurch die Ansicht WEGENERS gestützt, daß beide Kontinente früher mindestens sehr nahe zusammenlagen¹⁾. Ähnliches gilt für andere Gebiete. Insbesondere besteht noch weitgehende Übereinstimmung der Ergebnisse von ARGAND über den Bau von Asien mit der Entwicklung des Indischen Ozeans nach der WEGENERSchen Theorie (vgl. S. 407),

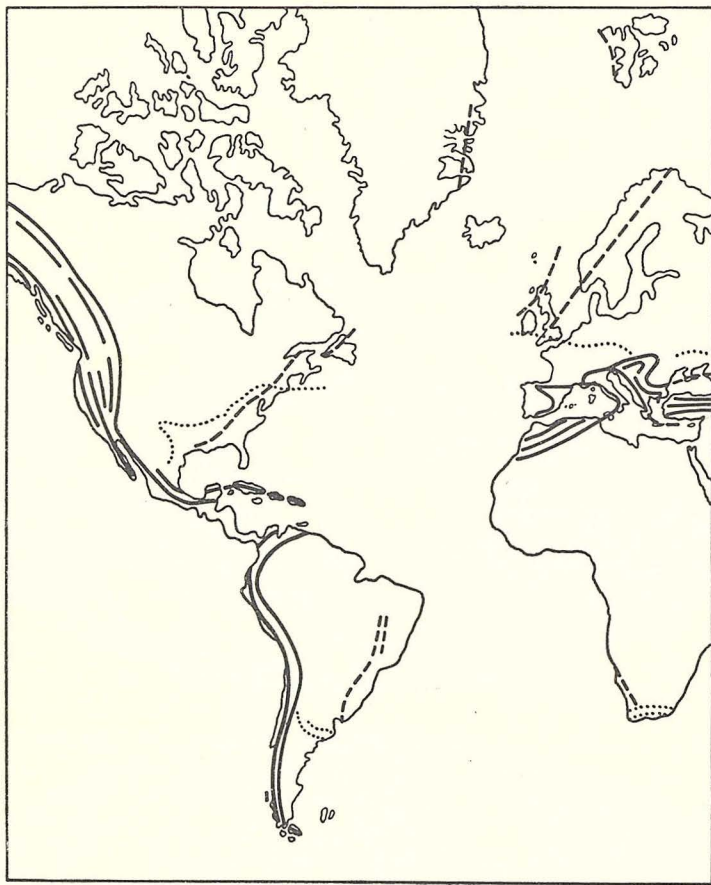


Fig. 189

Gebirgszüge nach HOLMES. Gleichartige Ketten in Südamerika—Afrika sowie in Nordamerika—Grönland—Europa besitzen gleiche Signaturen. In Nordamerika—Europa sind z. B. die herzynischen Gebirge nach HOLMES punktiert

sowie der Ergebnisse der holländischen Geologen über die Entwicklung des Sunda-Archipels mit entsprechenden Ansichten von WEGENER. Auch das Tiefenprofil zwischen Südamerika und der Antarktis (Fig. 190) erweckt ohne weiteres den Eindruck, daß hier eine Westdrift erfolgte, bei der Teile des Kontinentes im Untergrund steckengeblieben sind.

¹⁾ Von neuerer Literatur sei noch erwähnt: L. A. DU TOIT, Carnegie Inst., Publ. 381, Washington 1927.

Besonders eingehend hat sich WEGENER von Anfang an mit den Problemen der Paläontologie und Biologie beschäftigt, die im Zusammenhang mit seiner Theorie stehen. Auch hierbei ist eine ganze Reihe von bestätigenden Ergebnissen neben einigen Einwänden zu verzeichnen.

Besonders umfangreich sind die paläoklimatologischen Untersuchungen WEGENERS. Trägt man die Klimazeugnisse älterer Epochen in die heutigen Erdkarten ein, so ergeben sich zum Teil Anordnungen, die auch durch andere Annahmen über die Lage des Äquators in jenen Epochen nicht zu deuten sind. Ein besonders schönes Beispiel liefern die Eisspuren des Perm und Karbon. Figur 191 zeigt, daß deren Lage auch dann unerklärlich bleibt, wenn man den Äquator

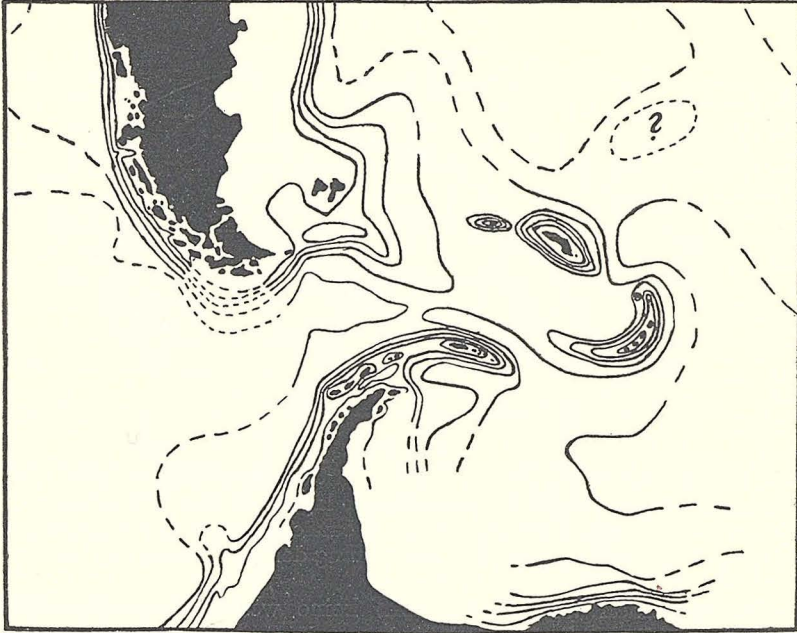


Fig. 190

Tiefenkarte der Drakestraße nach GROLL

(Aus A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane)

so annimmt, daß er die in der Figur angegebene günstigste Lage besitzt. Nimmt man aber mit WEGENER an, daß die Kontinente damals noch zusammenhingen, so fallen diese Eisspuren auf einen relativ engen Raum, der dann die Nachbarschaft des damaligen Südpoles ist. Die vorzügliche Übereinstimmung, mit der sich unter Voraussetzung der WEGENERSchen Theorie Klimazeugnis an Klimazeugnis reiht (Fig. 182 S. 517), ist eine starke Stütze für die Richtigkeit ihres Grundgedankens, wenn man auch anderseits nicht übersehen darf, daß die Eisspuren zum Teil verschiedenes Alter innerhalb der langen Epoche besitzen können. Eine kritische Darstellung dieser Probleme befindet sich in Band 2 des Handbuches.

Die Stellung WEGENERS zum Problem der Krustenverschiebung und Achsenverlagerung sowie seine Untersuchungen über Transgressionen und Regressionen haben wir bereits S. 519 erwähnt. Sie bilden weniger einen Teil seiner Verschiebungstheorie als des Weltbildes, das er darstellt.

Die Kräfte, welche die Verschiebungen bewirken, sind nach WEGENER in erster Linie die Polflucht- und Westdriftkräfte (Fig. 192), doch läßt er die Frage noch offen, ob andere Kräfte wesentlich beteiligt sind. Insbesondere weist er mit Recht darauf hin, daß auch in den Kräften, welche bei Polwanderungen besonders in dem Meridian der Polbahn entstehen, recht erhebliche Energien stecken.

Eine Untersuchung der Frage, ob Westdrift-Bewegungen durch Gezeitenreibung möglich sind, hat A. PREY¹⁾ angestellt. Er kam zu dem Ergebnis, daß zwar in früheren geologischen Epochen derartige Bewegungen durch Gezeitenreibung möglich waren, nicht aber in den letzten 50 bis 60 Millionen Jahren, selbst wenn man die *Viskositätskoeffizienten* so günstig wie möglich für die Theorie annimmt (Näheres in Band 2).

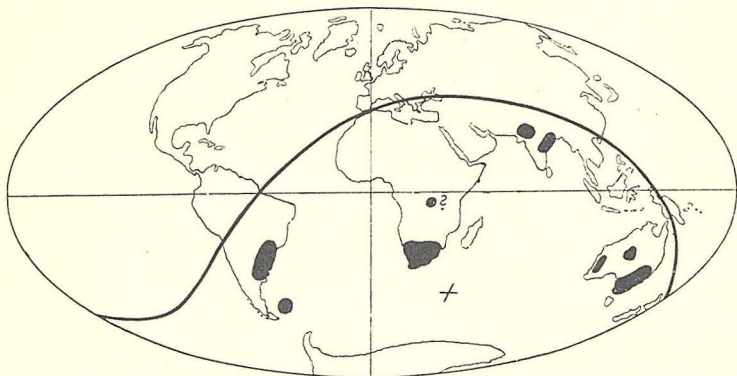


Fig. 191

Die Inlandeisspuren in Perm—Karbon auf den Kontinenten unter der Voraussetzung, daß diese damals genau so lagen wie heute. Ausgezogen: Die günstigste Äquatorlage. Dem Kreuz entspricht der zugehörige Südpol. Nach A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane

Andererseits fanden wir (S. 23), daß keine wesentlichen Westdriftkräfte für die ganze Scholle zu finden sind, und auch H. JEFFREYS²⁾ kam zu dem Ergebnis, daß die Westdriftkräfte, welche die von WEGENER geforderte Bewegung hervorrufen können, etwa 10^{10} mal so stark sein müßten als die Wirkung der Gezeitenreibung, daß aber solche Kräfte die Erdrotation in kürzester Zeit zum Stillstand bringen würden. Er geht weiter davon aus, daß die Polfluchtkraft etwa 4000 Dyn/cm^2 beträgt, und daß die Gesamtkraft in einem Kontinent mit einem Radius von 2000 km dann $4000 \pi (2 \cdot 10^8)^2 \text{ Dyn}$ wäre. Der Fließwiderstand, der von einer 40 km dicken Säule überwunden werden müßte, dürfte dann höchstens 10^5 Dyn/cm^2 betragen, während er in Wirklichkeit in den oberen Teilen der Erdkruste von der Größenordnung 10^9 ist, in größerer Tiefe allerdings abnimmt. JEFFREYS hält demnach Bewegungen der Kontinente — abgesehen von kleinen Wanderungen der ganzen Kruste — für unmöglich und die WEGENERSche Theorie für widerlegt. Auf der anderen Seite liegt jetzt eine derartige Menge von Ergebnissen über Verschiebungen (vgl. S. 458 ff.) vor, daß an der Existenz von Wanderungen kleinerer und größerer Teile der Erdkruste kaum noch gezweifelt werden kann. Die einzelnen Kräfte genügen aller-

¹⁾ Gerlands Beitr. z. Geophys. 15, 401, 1926.

²⁾ The Earth, 2. Aufl., S. 304 u. 321, Cambridge 1929.

dings wohl in der Tat nicht, um Bewegungen in *konsolidierten Teilen* der Erdkruste hervorzurufen, wohl aber bringen sie, wie wir sahen, gemeinsam schwache Stellen der Erdkruste zum Bruch und zum Fließen. Insbesondere dürfen wir unter keinen Umständen für die Bewegungen, welche die Erdkruste über dem Sima ausführt, oder für die Bewegungen in Geosynklinalräumen die üblichen Fließgleichungen und Viskositätskoeffizienten einsetzen. Im ersten Falle handelt es sich viel eher um gleitende Reibung, während im zweiten Falle der Verband viel lockerer ist als in den eigentlichen kristallinen Schollen und zudem die dann wirkenden Kräfte (Schrumpfung und Dehnung, vgl. S. 514) erheblich größer sind. Es kommt noch hinzu, daß die Spannungen an Unstetigkeitsflächen, also insbesondere Verwerfungen von weltweiter Bedeutung, wesentlich anwachsen können (vgl. S. 470).

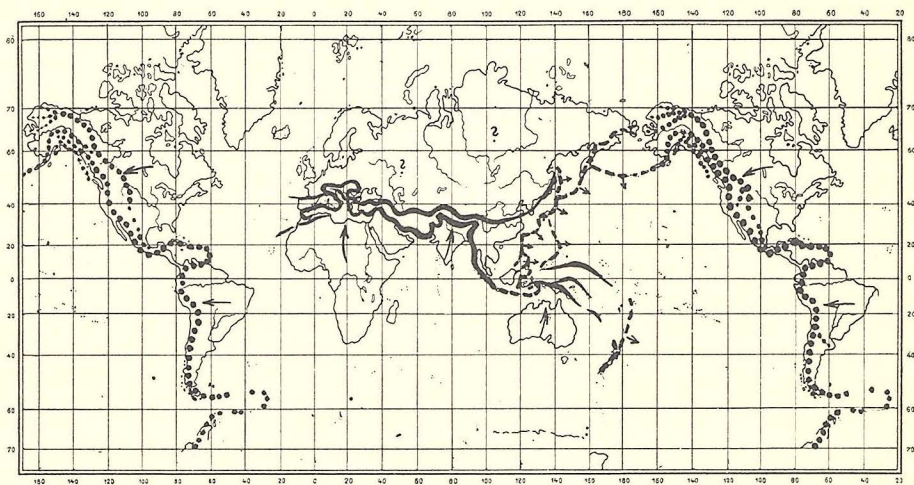


Fig. 192

Die Deutung der jungen Gebirge nach ARGAND-WEGENER. Schwarz = Mediterranes System. Punktiert = Westdriftsystem Amerikas. Strichel = Westdriftsystem Ostasiens und Australiens
(Aus STAUB, Der Bewegungsmechanismus der Erde)

Weitere *Einwände gegen die WEGENERSche Theorie* sind in großem Umfange erhoben worden (vgl. z. B. NÖLKE, a. a. O.). Einen Teil von ihnen haben wir in unseren seitherigen Darlegungen entkräftet, andere bleiben bestehen, so z. B. die Tatsache, daß sich zwar an der Westküste Amerikas bei der Westwanderung Gebirgszüge auftürmen, daß diese aber an den atlantischen Küsten fehlen, obwohl nach WEGENERS Ansicht hier ebenfalls eine Westdrift gegen simatischen Untergrund stattfindet. Der an und für sich richtige Einwand, daß die WEGENERSche Theorie überhaupt keinen Grund für die Trennung und weitere Entfernung Amerikas von Europa angibt, sondern diese einfach als Beobachtungstatsache hinstellt, läßt sich entsprechend dem Hinweis von WEGENER entkräften, daß durch die Polwanderungen erhebliche Dehnspannungen in der Nähe des jeweiligen neuen Äquators auftreten müssen (vgl. S. 514); hierzu kommen noch die Kräfte, welche die ganze Scholle über das Sima auszubreiten suchen. Bei einer tatsächlichen Richtung der Polbahn gegen Grönland müßten im übrigen im Atlantischen Ozean eher Stauchungen als Dehnungen zu er-

warten sein im Gegensatz zu den letzten geologischen Epochen, in denen die Polbahn im wesentlichen entgegengesetzt verlief (vgl. Fig. 159 S. 447).

Weiter läßt sich gegen die WEGENERSche Ansicht, daß sich Amerika von Europa-Afrika losgerissen hat, einwenden, daß die Nachbargebiete Afrikas in den umgebenden Ozeanen den gleichen stofflichen Aufbau wie der Kontinent besitzen, und daß dort Festland und Meeresboden eine stoffliche Einheit sind, ferner, daß der Übergang vom einen zum andern (im Gegensatz zu den Küsten des Pazifik) stetig erfolgt, wie die Untersuchungen von Erdbebenwellen zeigen (vgl. S. 453). Diese führen weiter zu dem Schlusse, daß sich der Boden des Atlantischen, anscheinend auch des Indischen und Arktischen Ozeans nur dadurch von dem kontinentalen Untergrund unterscheidet, daß in ihm die Dicke der obersten Schicht geringer ist, schätzungsweise um die Hälfte. Wir kommen, auch auf Grund der Dichte, zu dem Ergebnis, daß, im Gegensatz zu der Ansicht von WEGENER, nicht das Sima, sondern eine geschlossene Sialdecke von geringerer Dicke als unter den Kontinenten den Boden dieser Ozeane bildet. Wir sehen jedenfalls, daß die WEGENERSche Theorie in vieler Hinsicht überraschende Erklärungen für die Beobachtungen abgibt, daß sie aber in anderen Punkten diesen widerspricht. In der letzten Zeit hat im übrigen WEGENER seine Theorie insofern abgeändert, als er nunmehr annimmt, daß in großen Teilen des Atlantischen Ozeans eine mehr oder minder dicke Sialdecke vorhanden ist, und daß die in Frage kommenden Randkontinente sich nicht direkt berührten, sondern daß noch Zwischenstücke vorhanden waren, die nunmehr Teile des Atlantikbodens bilden. Er hat sich damit der Fließtheorie von GUTENBERG genähert. Sein Argument, daß die ebenen Flächen des Atlantikbodens Sima seien, ist wohl nicht zutreffend, da einerseits kein Grund zur Annahme vorliegt, daß der Simaboden eben ist, anderseits die Meteorexpedition keine derartigen Ebenen festgestellt hat.

§ 284. Die Fließtheorie von GUTENBERG. Zur Beseitigung der oben angedeuteten Schwierigkeiten stellte GUTENBERG unter wesentlicher Verwendung von Gedanken der WEGENERSchen Hypothese seine „*Fließtheorie*“ auf¹⁾, die alle Vorteile der WEGENERSchen Theorie besitzt, nicht aber die zuletzt angeführten Mängel. Sie unterscheidet sich dadurch wesentlich von jener, daß GUTENBERG nicht ein Zerreißen der Kontinentalscholle annimmt, sondern ein Auseinanderfließen, verursacht durch die Kräfte, welche das hydrostatische Gleichgewicht der Erdkruste herzustellen versuchen und eine Ausdehnung der Scholle über die ganze Erde zum Ziele haben (vgl. Fig. 187). Diese sind, wie wir sahen, von der Größenordnung 10^9 Dyn/cm², also etwa gleich dem Fließwiderstand der Gesteine (vgl. S. 456). Infolgedessen werden die Fließbewegungen in Gebieten mit kleinem Fließwiderstand erfolgen können, in solchen mit relativ großem Fließwiderstand nicht möglich sein.

Diesen Kräften überlagern sich dann noch die Spannungen durch die Polfluchtkräfte, durch die Schrumpfung der Erde und durch die Polwanderung. In Figur 193 ist die Lage der Scholle so eingetragen, daß den Klimazeugnissen entsprochen ist, und angenommen wurde, daß Regressionen und Transgressionen innerhalb der Scholle nur durch Stauchungen und Dehnungen erfolgt sind, und daß die Grenze der Scholle gegen den Pazifik immer durch die gleichen Gebiete gebildet wurde. Über die Frage der Krustenwanderung haben wir bereits S. 514 gesprochen (vgl. auch Fig. 184 S. 520). In Figur 193 tritt deutlich hervor, daß die Dehnungen, die durch Transgressionen erkennbar sind, in erster Linie an den äquatorwärts wandernden Teilen der Erdkruste auftraten, daß

¹⁾ Gerlands Beitr. z. Geophys. 16, 239, 1927, und 18, 281, 1927.

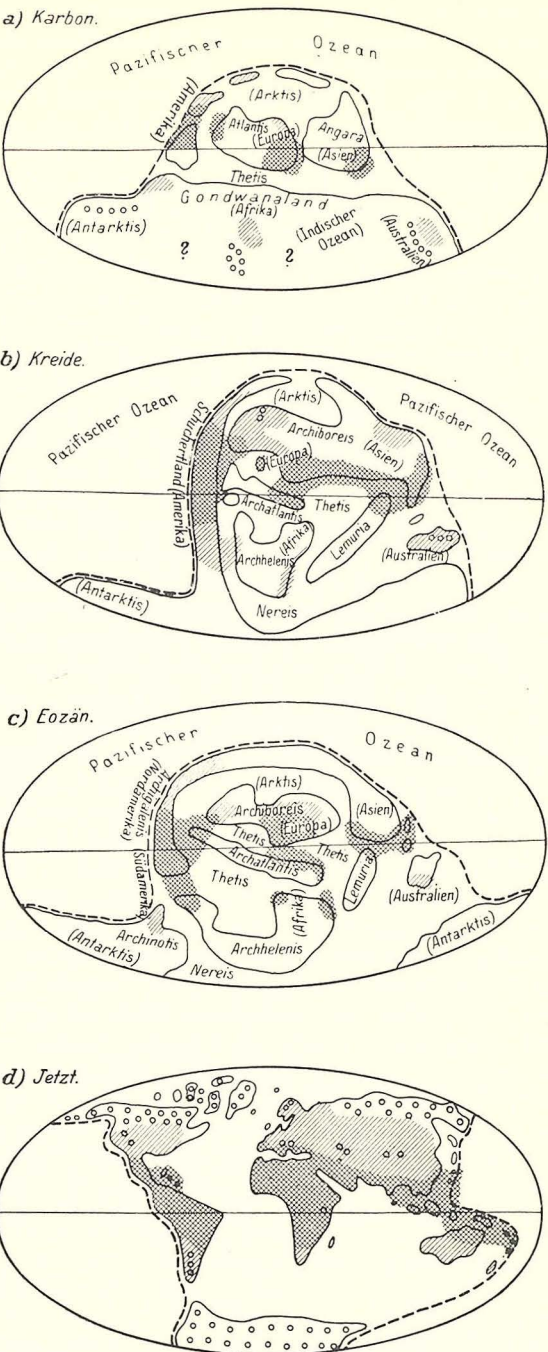


Fig. 193

Skizzen zur Verteilung der Klimazeugen in verschiedenen Epochen. Kreise: kaltes Klima; einfach schraffiert: gemäßigtes Klima; gekreuzt schraffiert: heißes Klima; gestrichelt: Grenze der Kontinentalsscholle; ausgezogen: vermutliche Grenzen des Meeres

diese Dehnungen eine Ausbreitung der ganzen Scholle zur Folge hatten, daß diese ferner (unter der Mitwirkung der Polfluchtkräfte) sich so verschob, daß sie nunmehr etwa symmetrisch zum Äquator liegt. Über eine Reihe von Einzelheiten, z. B. über die Vorgänge an der Westküste von Amerika, wo die Scholle gegen den Pazifikboden vorstößt, hatten wir S. 525 gesprochen, ebenso über die Wahrscheinlichkeit, daß hierbei auch *Drehungen der Scholle* eintreten können. Solche wurden in der Tat festgestellt, so wies z. B. S. FUJIWHARA¹⁾ darauf hin, daß anscheinend der ganze Boden des Pazifischen Ozeans in den letzten Epochen entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn rotierte, allerdings in verschiedenem Maße. Damit wäre die Annahme gleichbedeutend, daß sich die Randkontinente im Uhrzeigersinn bewegten, also Japan nach Norden, Amerika nach Süden (vgl. hierzu auch die Ergebnisse von CLOOS S. 460). Allerdings ist es meist schwer zu entscheiden, ob es sich um Drehungen oder Verschiebungen der Scholle handelt. Eine Krustenverschiebung, welcher eine Polwanderung von Amerika weg gegen Asien entspricht, und wie sie in den letzten Epochen vorwiegend verlaufen zu sein scheint, würde an den meisten Küsten ein ähnliches Ergebnis zur Folge haben. Jedenfalls können erst genaue Feststellungen der verschiedenen Bewegungen der Erdoberfläche, die erst in den letzten Jahren begonnen wurden, ein genaueres Bild der Gesamtbewegung und damit Hinweise auf die Ursache liefern (vgl. auch S. 462). Leider ist es ja nicht so, daß wir eine einzige Kraft haben, die in bestimmtem Sinne wirkt, sondern eine ganze Reihe von solchen, die sich ganz verschiedenartig kombinieren. Es kommen noch schwächere Kräfte hinzu, sei es durch die Polschwankungen, sei es mehr lokal durch physikalische und chemische Vorgänge, so daß bald mehr oder minder lokale Verdickungen der Kruste, verbunden mit Auftauchen von Inseln, vielleicht auch von kleinen Landbrücken, entstehen können, dann wieder Senkung von Gebieten, wie wir es an den Westküsten Mitteleuropas zurzeit finden. Bei all diesen Vorgängen braucht die Oberfläche keine Deformation zu erleiden, es treten höchstens geringe Neigungsänderungen auf. Daß hierbei z. B. früher auf dem Lande gebildete Flußtäler sich nunmehr weit am Meeresboden verfolgen lassen, ist durchaus verständlich. Dabei können alle Vorgänge unter Wahrung der Isostasie vor sich gehen, während vertikale Bewegungen von größeren Landgebieten, wie sie die Brückentheorien annehmen (Hebung und Senkung der Gebiete zwischen den Kontinenten), starke Störungen der Isostasie zur Folge haben müßten. Daß im übrigen die der Fließtheorie zugrunde gelegten Werte über den Aufbau der Erdkruste gut den Ergebnissen über die Schwere entsprechen, zeigen die Untersuchungen von HEISKANEN²⁾. Schon hierdurch wird der von A. WEGENER³⁾ erhobene Einwand widerlegt, daß die *Tiefe des Indik und des Atlantik* nur halb so groß sein könnte als die des Pazifik. Sei h_1 die Dicke einer Sialscholle unter dem Boden des Atlantik von der Dichte ρ_1 , D die Tiefe des Ozeans über einer ungestörten Simaoberfläche, d die Meerestiefe über dem Sial im Atlantik, ρ_2 die Simadichte, so ergibt sich im Falle der Isostasie angenähert für die Sialdicke unter dem Atlantik

$$h_1 = \frac{(D-d)(\rho_1-1)}{\rho_2-\rho_1} = 2,1 \frac{D-d}{\rho_2-\rho_1}, \text{ falls } \rho_2 = 3,1 \quad \dots \quad (245)$$

Nun schwankt die Sialdicke erheblich (vgl. S. 453). Setzen wir noch die mittlere Meerestiefe über dem ungestörten Pazifikboden zu 5 km, über dem Sial im At-

¹⁾ GERLANDS, Beitr. z. Geophysik, **16**, 14, 1927.

²⁾ Zeitschr. f. Geophys. **3**, 217, 1927.

³⁾ a. a. O. 4. Aufl., S. 213.

lantik zu 3,8 km, so erhalten wir, falls $\delta = \rho_2 - \rho_1 =$ Dichtedifferenz Sima-Sial, für die Dicke des Sial im Atlantischen Ozean

$$\begin{array}{l} \text{falls } \delta = 0,05 \quad 0,1 \quad 0,2 \quad 0,3 \quad 0,4 \\ h_1 = 50 \quad 25 \quad 13 \quad 8 \quad 6 \text{ km.} \end{array}$$

Nach den Untersuchungen von WASHINGTON wäre im Boden des Atlantischen Ozeans etwa $\rho_1 = 2,9$, somit ist $\delta = 0,2$ (vgl. S. 453) und $h_1 =$ etwa 13 km in guter Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen.

Der weitere Einwand von WEGENER, daß der Boden des Atlantik große Simaflächen enthält, daher viel weniger gebirgig sei als die sialischen Kontinente, wurde bereits S. 532 erörtert. Daß auch die Klimazeugnisse durchaus zu unserer Ansicht passen, obwohl die einzelnen Krustenteile nun etwas größere Entfernungen voneinander in den älteren Epochen besitzen, als WEGENER annahm, zeigt Fig. 193. Daß schließlich die Annahme von *Krustenverschiebungen* im Gegensatz zu WEGENER, der Achsenverlagerungen annahm, viel harmonischer in die Theorie sich einordnet, wurde bereits S. 514 erwähnt. Erstere bilden im übrigen auch keinen Widerspruch zur Grundfrage der WEGENERSchen Theorie,

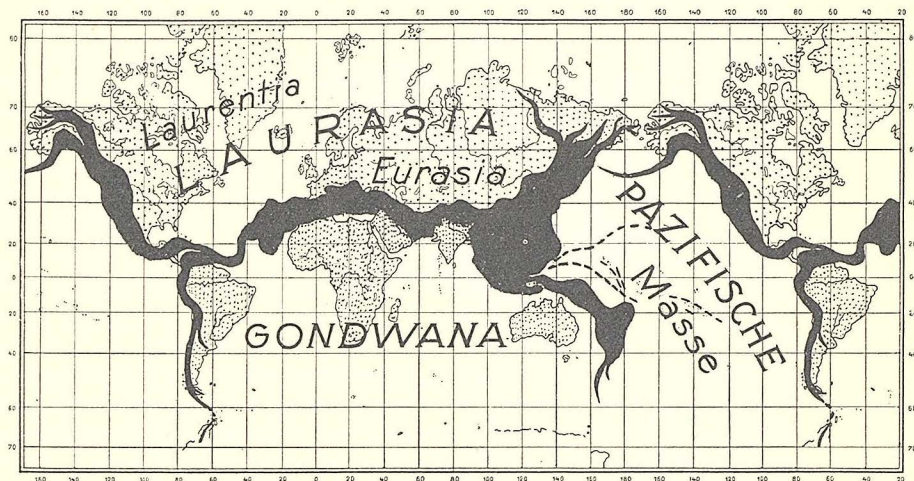


Fig. 194

Das alpine System der Erde

Nach R. STAUB, Der Bewegungsmechanismus der Erde

§ 285. Der Bewegungsmechanismus der Erde nach STAUB. Den Ausgangspunkt für die Hypothesen von R. STAUB bildeten seine Untersuchungen über den Bau der Gebirge der Erde, besonders der Alpen. Er kam zu dem Ergebnis¹⁾, daß der Bau der Erdkruste im wesentlichen aus vier Elementen besteht (Fig. 194): der Pazifischen Masse, den beiden Kontinentalblöcken Laurasia und Gondwana und der Thetys-Geosynklinale. Nach STAUBS Ansicht entstand die *Pazifische Masse bei der Loslösung des Mondes von der Erde* (vgl. S. 475). Die rasche Erstarrung der geschmolzenen Massen in der Narbe bewirkte die Bildung eines „undifferenzierten basischen Panzers“, der sich durch besondere Starrheit auszeichnet. Aus der relativ hohen Richtigkeit und Inkompressibilität des Pazifikbodens schließt STAUB, daß er gegenüber Drucken der Nachbarkontinente un-

¹⁾ Der Bewegungsmechanismus der Erde, Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin 1928.

nachgiebig sei; schon hier sei darauf hingewiesen, daß dieser Schluß schon deshalb nicht zwingend ist, weil bei derartigen Vorgängen nicht die Konstanten für kurzdauernde elastische Deformationen, sondern die Viskositätskoeffizienten und der Fließwiderstand maßgebend sind.

Die zwei nächsten Bausteine der Erdkruste, die *Kontinentalmassen von Laurasia und Gondwana*, erschließt STAUB aus den Ergebnissen der Geologie. Insbesondere zeigt die Verfolgung der alpinen Leitlinien der Erde, daß sich diese beiden Grundkontinente (Fig. 195) aktiv gegeneinander und längs des Pazifischen Blockes vorgeschoben haben. Gondwana rückt dabei auf der ganzen Linie nach Norden, Laurasia mit Ausnahme des von dem vordringenden Gondwana ganz überwältigten Zentralsegmentes Europas nach Süden. Die Kraft, welche dies bewirkt, ist die *Polflucht*. Diese wechselt im Laufe der Zeit ihre Wirkungsweise, da sich die Lage der Kontinente zueinander und zu dem Äquator ändert. Auch das Ergebnis ist verschieden, da die Stoßkraft der Kontinente verschieden ist, und somit sogar ein Teil des südwärts vordringenden Kontinentes überrannt und nach Norden gedrängt werden kann. Dies trifft z. B. bei Europa zu, wo die Ursachen in älteren Epochen liegen. Auch Drehungen werden so eingeleitet.

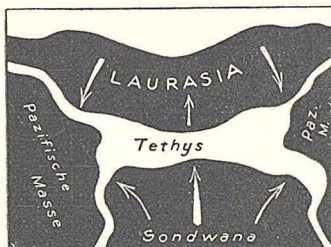


Fig. 195

Schema der gebirgsbildenden Kontinentalverschiebungen im Jura
Nach R. STAUB

Die Polfluchtkraft „erschöpft sich“ nach STAUB (dies wäre nur zutreffend, wenn sich ein derartig ausgedehntes Gebirge gebildet hätte, das der Polfluchtkraft das Gleichgewicht hält) mit der Türmung eines in der Hauptsache immer äquatorial gelegenen Gebirgssystems zwischen den beiden Grundkontinenten der Erde, und nun überwiegen die Vorgänge im Untergrund der Schollen. Dort hatte zum Ausgleich des Massenzuflusses in den oberen Schichten eine *polwärts gerichtete Unterströmung* eingesetzt (Fig. 196), die nun die „festen Schollen der Kontinente auf ihrem Rücken mit sich reißt, und damit eine neuerliche Bewegung der Kontinente gegen die Pole, eine allgemeine *Poldrift* derselben auslöst“.

„Dieser Polstrom wirkt so lange, bis ein Gleichgewicht der subkrustalen Massen neu hergestellt ist, und er wirkt naturgemäß um so leichter, als die zentrifugale Komponente der Polflucht in den niederen Breiten, wo in den meisten Fällen die polflüchtigen Kontinente sich begegnen und wo somit die großen Gebirgssysteme entstehen, nur mehr sehr gering, ja in vielen Fällen infolge Überschreitung des Äquators überhaupt schon negativ geworden ist“. Hierzu ist zu bemerken, daß die *Wirkung der Polfluchtkräfte* auf die Gebirgsbildung, wie wir sahen, nur langsam abnimmt, und daß die Veränderungen und Verschiebungen erst in geologischen Epochen merklichen Einfluß gewinnen. Die von STAUB gegebene Erklärung für das Rückdriften der Kontinente („Poldrift“) kann somit nicht befriedigen, auch wenn man die Größe der verschiedenen Kräfte für ausreichend hält, was aber nach unseren Ergebnissen weder für die Polfluchtkraft (vgl. S. 525) und sicher noch viel weniger für die Poldriftkraft

der Fall ist. — STAUB nimmt nun an, daß auch diese Rückdrift mehr Masse wegführt, als dem Gleichgewichtszustand entspricht, an gewissen Stellen sinkt Material ab zum Ausgleich des Defizites in der Tiefe, schmilzt zum Teil, und es bilden sich so zwischen den beiden Kontinenten schwache Zonen, die neuen Geosynklinalen. Mit der zunehmenden Dehnung derselben setzt vom Kontinent her ein subkrustaler Gegenstrom ein, der „*Geosynklinalstrom*“, der die Poldrift zum Stillstand bringt und gemeinsam mit der Polfluchtkraft einen neuen Vorstoß der Kontinente gegeneinander bzw. gegen den Äquator einleitet (vgl. Fig. 197).

Nach STAUB regieren also nicht Polflucht und Westdrift oder pazifikwärts gerichtete Drift die Bewegungen der Erdkruste — die Abspaltung Amerikas lehnt er ab —, sondern Polflucht und Poldrift. Dieses Wechselspiel der beiden Kräfte glaubt er in der Erdgeschichte dreimal zu erkennen; Figur 198 zeigt das schematische Diagramm, das STAUB hierzu gegeben hat, Figur 199 den herzynischen Grundplan in Europa. Wir haben kurz gefaßt folgenden Inhalt eines Zyklus:

Annäherung der Kontinente =

Zusammendrängung der Geosynklinale

Gebirgsbildung = Auspressung der Geosynklinale

Zerreißen der Kontinente =

Bildung der neuen Geosynklinale.

STAUB sieht den ganzen Vorgang im übrigen als durch die Beobachtungen gegeben an und weist darauf hin, daß in dem Falle, in dem die theoretisch gefundenen Polfluchtkräfte nicht groß genug seien, man eben andere Kräfte suchen müsse; im übrigen verweist er auf die Bedeutung der Unterströmungen.

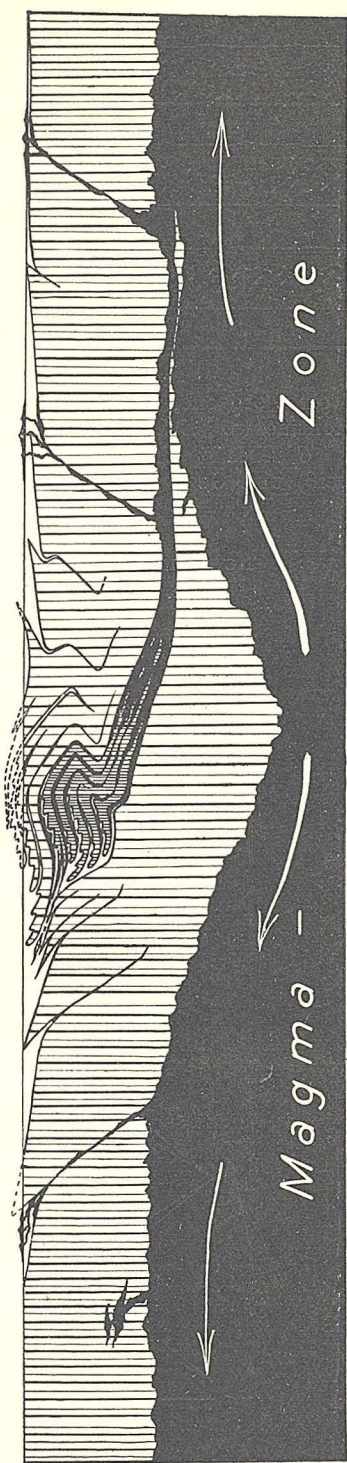


Fig. 196

Die Verdrängung der subkrustalen Massen unter einem Deckengebirge von alpinem Typus. Nach R. STAUB. Weite Schraffur = Vor- und Rücklandsockel; enge Schraffur = geosynklinaler Unterbau; weiß = Sedimente des betr. orogenen Zyklus; schwarz = Magmazone (Aus: „Der Bewegungsmechanismus der Erde“)

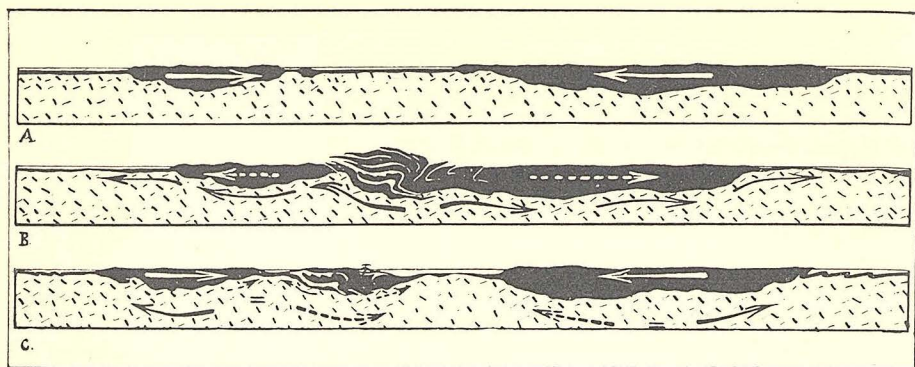


Fig. 197

Der Verlauf eines orogenen Zyklus nach R. STAUB. *A* Zusammenschub der polflüchtigen Kontinente. *B* Zusammenprall der Kontinente, Auspressung der Geosynklinalen. *C* Abdrift der Kontinente, Bildung einer neuen Geosynklinalen. Polstrom (weiß) und Geosynklinalstrom (schwarzer Pfeil) halten sich die Waage. Es folgt dann wieder Zustand *A*

Bewegungsrichtung der Kontinente gegen

Pol ← → Äquator ← → Pol

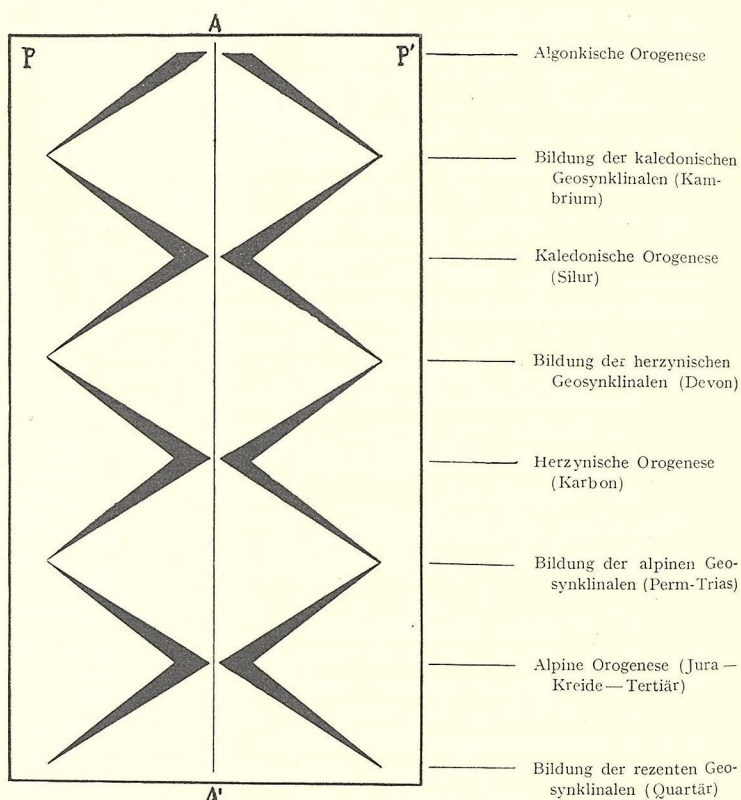


Fig. 198

Diagramm des irdischen Bewegungsrhythmus
Nach R. STAUB, Der Bewegungsmechanismus der Erde

Damit hat er zwar eine großzügige Deutung der Erscheinungen gegeben, die ebenso durch ihre verblüffende Einfachheit wie durch die Schönheit ihrer Form begeistert, die aber bei näherer Betrachtung die Tatsache nicht hinwegzuschaffen vermag, daß den physikalischen Grundlagen vielfach Zwang angetan wird, ja daß diese, worauf wir verschiedentlich hinwiesen, durchaus der Ansicht von STAUB widersprechen. Schließlich besitzt die ganze Darstellung einen kleinen Schönheitsfehler: STAUB ging von seinem Spezialgebiete aus, der Alpentektonik, und er zeigt nun, wie die ganze Gebirgsbildung zwischen Laurasia und Gondwana ähnlich verläuft. Er unterschätzt aber hierbei viel zu sehr die Bedeutung der Gebirgszone, welche den Pazifik umsäumt und kommt dadurch in Verbindung mit seiner Voraussetzung, daß der Pazifikboden unbeweglich sei, zu seiner Ablehnung aller Bewegungen der Erdkruste längs Breitengraden.

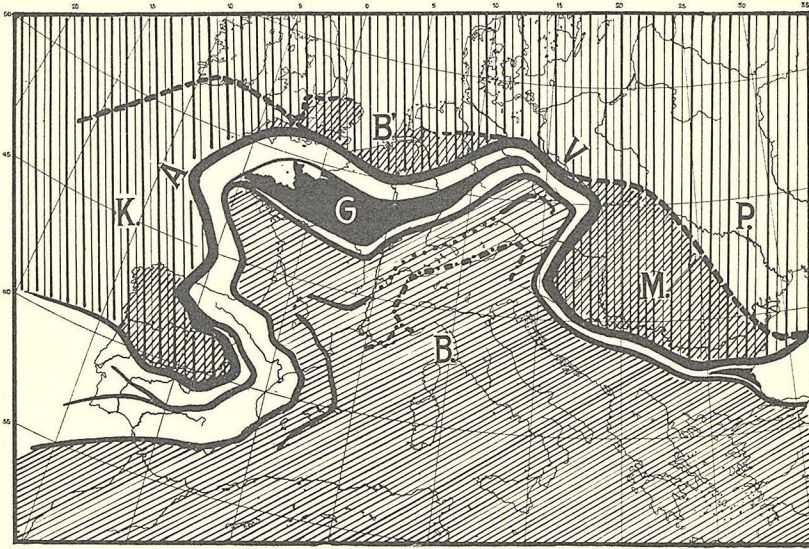


Fig. 199

Der herzynische Grundplan Europas nach R. STAUB. Senkrechte Schraffur = Vorland; weiß = herzynische Hauptgebirge; schwarz = Zwischengebirge; schräge Schraffur = Rückland

§ 286. Verschiedene Ursachen für Kontinentaldrift. In dem Maße, in dem die Überzeugung Fortschritte machte, daß Kontinentaldriften vorhanden sind, mehrten sich auch die Versuche, Erklärungen dafür zu finden. Einen Überblick über einige neuere Hypothesen dieser Art gab z. B. A. HOLMES¹⁾. Er verwies insbesondere darauf, daß durch die verschieden starke Abkühlung unter den Ozeanen und Kontinenten Unterströmungen erzeugt werden können, die noch durch chemische Vorgänge im Magma unterstützt werden können. Er hält es auch für möglich, daß magnetische oder elektrische Vorgänge bei der Krustenverschiebung mitspielen.

Auch B. LINDEMANN (vgl. S. 511) und L. J. KRIGE²⁾ stehen auf dem Standpunkt, daß die Kontinente auseinanderdriften. Beide versuchen, die JOLYSche

¹⁾ A Review of the Continental Drift Hypothesis. The Mining Magazine 1929.

²⁾ Magmatic Cycles . . . , Proc. Geolog. Soc. of S. Africa p. XXI, 1929.

Hypothese so umzuformen, daß sie eine Erklärung der Kontinentaldrift gibt. Nach KRIGE bewirken die größere von dem Zerfall der radioaktiven Substanzen herrührende Wärme unter den Kontinenten und die geringere Abkühlung eine stärkere Erhitzung und führen zu Bewegungen, die unter den Kontinentalböden ozeanwärts gerichtet sein sollen. Durch die Erwärmung des Ozeans, die im übrigen ganz ähnlich wie bei JOLY erfolgt (vgl. S. 484), verstärkt sich die Wasserdampfbildung und damit die Bewölkung, die ihrerseits wieder kühleres Klima zur Folge hat. KRIGE sucht so die meist gleichzeitig mit Gebirgsbildung eintretenden Klimaänderungen zu erklären (vgl. S. 521). Auf der einen Seite gelten jedoch die gleichen Einwände gegen diese Hypothese wie gegen die von JOLY, insbesondere ergibt sich eine viel zu kleine geothermische Tiefenstufe, auf der anderen Seite würde sich vielleicht so eine Klimaänderung auf der ganzen Erde, nicht aber die beobachtete Verschiebung der Klimazeugen erklären lassen. Auch die Hypothese von LINDEMANN ist, wie bereits S. 511 erwähnt wurde, unhaltbar. LINDEMANN nimmt im übrigen an, daß die Überproduktion von Wärme so langsam vor sich geht, daß es während aller geologischen Zeitalter noch nicht zu einer Aufschmelzung der Kruste kam. Schließlich suchte H. HAVEMANN¹⁾ die Bewegungen der Kontinente lediglich aus den Westdriftkräften unter Berücksichtigung der verschiedenen Reibungswiderstände zu erklären. Letztere wirken zweifellos bei den Vorgängen mit, wie wir mehrfach erwähnten. Da jedoch die Westdriftkräfte höchstens ganz gering sind, entfällt somit auch die Grundlage für die Theorie HAVEMANNs in der angegebenen Form²⁾.

Kapitel 27

Die Entwicklung der Erde

§ 287. Die Ergebnisse der Kraftwirkungen in der Erde. In § 248 S. 462 hatten wir einen Überblick über die Kräfte und ihre Wirkungen gegeben, nunmehr können wir an Hand der vorangegangenen Abschnitte versuchen, die hieraus resultierenden Folgen zusammenzustellen:

Weltweite Vorgänge

Ursache der Kraft	Ergebnis
Chemische Vorgänge, Schwere	Bildung von Kern, Zwischenschicht, Mantel, Schichtung der Kruste.
Kosmische Ursachen	Loslösung des Mondes, Bildung des Pazifik.
Abweichung der Erde vom hydrostatischen Gleichgewicht durch die Loslösung des Mondes im Pazifik — eventuell auch aus einer anderen Ursache.	Tendenz zur Ausbreitung der übriggebliebenen kontinentalen Kruste über die ganze Oberfläche; Dehnung, Bildung der übrigen Ozeane.

¹⁾ Die Naturwissenschaften 17, 743, 1929.

²⁾ W. JARDETZKY (vgl. ¹⁾ S. 490) suchte die Kontinental-Drift durch kosmisch bedingte Unterströmungen zu erklären.

Ursache der Kraft	Ergebnis
Niveaudifferenz Kontinent—Sima (Polfluchtkraft).	Verschiebung der kontinentalen Scholle in symmetrische Lage zum Äquator, hierbei Bildung von Gebirgen an der Front der Scholle (Teile der Pazifikumrandung); Gebirge längs des Äquators (Mitwirkung der folgenden Kräfte). Polwanderungen.
Sedimentation	Senkung der Schelfgebiete; Geosynklinalbildung.
Abkühlung der Erde	Schrumpfung, Auspressung der Geosynklinalen besonders in der Nähe des Äquators, wo die Polfluchtkräfte die Kontinente zusammenpressen.
Polwanderungen	Dehnung der äquatorwärts wandernden Erdteile, Regressionen und Transgressionen.
Chemische Vorgänge, Änderung des Aggregatzustandes	Vulkanismus, Unterströmungen (auch bei anderen Vorgängen).

Lokale Vorgänge

Polschwankungen	Lokale Auslösung von Spannungen (Erdbeben)
Luftdruckänderungen	Desgl.
Seestandänderungen	Desgl.
Gezeiten	Desgl.
Bildung oder Abschmelzen von Inlandeis	Lokale Niveauänderungen
Abtragung	Desgl. Bei größerem Umfange Unterströmungen.

§ 288. **Zusammenfassung.** Mit der vorstehenden Übersicht haben wir im Prinzip die uns gestellte Aufgabe, soweit es uns möglich ist, gelöst. Wir haben nunmehr nur noch diese Ergebnisse so zusammenzustellen, daß die Verbindung zwischen Anfangs- und Endzustand deutlicher hervortritt.

Wir gehen davon aus, daß die *Erde ursprünglich ein heißer, amorpher Körper* war, dessen Temperatur überall über der Kristallisationstemperatur lag und der überall einen relativ geringen, praktisch verschwindenden Fließwiderstand besaß. Dabei können übrigens, wie beiläufig bemerkt sei, schon damals in großen Teilen sowohl die Richtigkeit als auch insbesondere die Kompressibilität ähnliche Werte besessen haben wie heute. Einerseits unter der Wirkung der Schwere andererseits unter chemischen Umlagerungen ähnlich wie dies V. M. GOLDSCHMIDT geschildert hat (vgl. S. 478), bildete sich in dem Erdkörper *der Kern, die Zwischenschicht und der Mantel* aus; die chemischen Umlagerungen dauerten besonders in letzterem auch weiterhin an.

Als diese Scheidung in die verschiedenen Schichten bereits eingetreten war, kam die durch die Sonne erzeugte Gezeitenwelle in Resonanz mit der Eigenschwingung der Erde, es entstanden in der Kruste des Erdkörpers hohe

Gezeiten, schließlich bildete sich eine Birnenform aus, die sich in *Erde und Mond* aufteilte. Dabei nahm der Mond an der Stelle, an der er sich loslöste, die ganze oberste Krustenschicht mit, schwereres Tiefenmaterial gelangte plötzlich an die Oberfläche und kristallisierte dort. Der Überrest dieser Stelle ist der *Boden des Pazifischen Ozeans*. Die Katastrophe hatte einen derartigen Umfang, daß keine Zeugen der vermutlich schon vorher erfolgten Kristallisation von Teilen der Erdkruste mehr übrig sind, und die ältesten gefundenen Gesteine aus der folgenden Epoche der Neubildung der Erdkruste herrühren. Sollte sich der Mond nicht von der Erde losgelöst haben, was z. B. NÖLKE (Band I) annimmt, so wäre eine andere Erklärung für die Tatsache zu suchen, daß allein im Pazifischen Ozean die kontinentale Kruste fehlt. NÖLKE nimmt z. B. an, daß der Pazifikboden aus inneren Ursachen entstand und die Narbe des letzten großen Ausbruches bei der Bildung der Erdkruste ist. Für das folgende hat die Art und Weise, *wie* sich der Boden des Pazifischen Ozeans so abweichend von der übrigen Erdkruste bildete, keine Bedeutung, sondern nur die Tatsache, *daß* er so gebildet ist. Der Vorgang der Loslösung des Mondes ist dann lediglich durch eine andere Ursache zu ersetzen, die die gleiche Wirkung hatte.

Im Laufe der Zeit *dehnte sich der Rest der obersten Kruste* (Kontinentalblock), der infolge seines geringeren spezifischen Gewichtes über die Oberfläche des Bodens an der Bildungsstelle des Pazifik hinausragte, unter der Wirkung der Kräfte, welche hydrostatisches Gleichgewicht zu bewirken suchen, über den Rand der entblößten Stelle aus. Dabei gaben Stellen mit geringerem Fließwiderstand mehr nach als andere; bei der weiteren Dehnung wurden in erster Linie diese Gebiete dünner, sie buchteten sich vor allem an der Unterseite, dann aber auch oben ein. Infolgedessen wurden diese Teile des ursprünglich fast ganz über das Meer hinausragenden Kontinentalblockes von Wasser überflutet, es bildeten sich insbesondere *der Atlantische und der Indische Ozean* (Fig. 184 S. 520). Dieses Auseinanderdriften der Scholle erfolgte im wesentlichen unter Dehnung ohne größere Zerreißen. Im Untergrunde fanden zum Massenausgleich entsprechende Fließbewegungen statt (vgl. Fig. 187 S. 525).

Über die *Lage des Blockes* in den ersten Zeiten nach der Bildung des Pazifischen Ozeans wissen wir nichts Genaueres. Das Gleichgewicht der Erde war zunächst erheblich gestört, es fanden ziemlich sicher große Veränderungen in der Erdkruste statt, im ganzen zerstörten Gebiet trat flüssiges Magma in großem Umfange aus, *erhebliche Polverlagerungen* waren die Ursache für Zerrungen und Dehnungen (vgl. S. 514); selbst innerhalb der einzelnen Epochen traten *Klimaänderungen* auf, so daß wir heute zusammengehörige Klimazeugnisse aus jener ältesten Zeit nicht mehr feststellen können, da die Bestimmung der Zeitpunkte nicht genau genug möglich ist. Im *Karbon* hatte sich wieder eine gewisse Ruhe eingestellt. Der Kontinentalblock lag damals im wesentlichen auf der Südhalbkugel (Fig. 193, S. 533). Unter der gemeinsamen Wirkung der hydrostatischen Kräfte, die wir oben skizziert haben, und der Polfluchtkraft verschob sich der Block so, daß er unter allseitiger Ausdehnung in eine mehr symmetrische Lage zum Äquator kam (vgl. S. 534). Die verschiedene Reibung im Untergrunde bewirkte dabei, daß der Block nicht einfach *nordwärts driftete*, sondern es traten auch *Drehmomente* auf, ferner *Dehnungen* der Teile, die sich dem Äquator näherten, *Stauchungen* der Gebiete, welche sich von ihm entfernten; *Regressionen* und *Transgressionen* waren eine weitere Folge dieser Verschiebungen (vgl. S. 514 und S. 519). An der Front der vordringenden und sich ausbreitenden Scholle entstanden, wie wir dies Seite 525 ff. näher ausgeführt haben, die Randgebiete des Pazifik, besonders an dessen Ostküste.

Inzwischen machte die *Abkühlung der Erde* weitere Fortschritte (vgl. S. 509), die Kristallisation setzte sich langsam fort, die tieferen Schichten der Erdkruste (in 50 bis 200 km Tiefe in erster Linie) schrumpften infolgedessen, die äußersten 50 km mußten sich der Unterlage anpassen, es entstanden *Druckspannungen*, die sich in erster Linie an den schwachen Stellen der Erde äußern mußten. Solche sind zunächst die Umrandung des Pazifik, die sich im Laufe der Zeit infolge des Vordringens der Kontinentalscholle pazifikwärts verschob. Dort wurden bald größere, bald kleinere Mengen von Magma ausgepreßt; der heutige Vulkanismus dieser Zone ist zum Teil eine Folge hiervon. Aber nur ein relativ geringer Teil der Massen, denen bei der Kontraktion der Raum zu eng wird, gelangt auf diese Weise an die freie Oberfläche. In dem größten Teil der Erde wächst die Spannung, bis sie schließlich an einer schwachen Stelle die Fließfestigkeit überschreitet, der Verband der Kruste sich löst und ein Teil ausgepreßt wird.

Bei der Ausbildung der dabei in Frage kommenden schwachen Stellen wirken sicher verschiedene Umstände mit. Zunächst hatten, wie erwähnt, die Polwanderungen Dehnungen und Stauchungen zur Folge, es traten Transgressionen ein, in den Transgressionsgebieten erfolgte stärkere Sedimentation, die ihrerseits wieder zu Senkungen des Bodens, bei stärkerer Ausbildung auch zu größeren Unterströmungen führte; es begannen an diesen Stellen lokale Schmelzprozesse, eine Zone besonders großer Schwäche, eine *Geosynklinale* hatte sich gebildet (vgl. S. 473). Man sieht, daß im allgemeinen die überfluteten Senkungsgebiete zu Sedimentationsgebieten und schließlich zu besonders schwachen Zonen wurden, die durch Druckkräfte besonders leicht ausgepreßt werden konnten, nachdem durch die Sedimentation die Senkung wesentlich verstärkt worden war. All diese Vorgänge sind charakteristisch für die Geosynklinalen, bei deren Definition der eine Autor die eine, ein anderer Autor eine andere Eigenschaft in den Vordergrund stellte. Es kommt noch hinzu, daß an der Grenze dieser Zonen mit relativ kleinem Widerstand gegen Formveränderungen die Spannungen besonders hohe Werte erreichen müssen (vgl. S. 470). Schließlich wird ein Teil des Materials der Geosynklinale ausgepreßt, wobei ursprünglich über größeren Räumen abgesetzte Sedimente auf kleineres Gebiet zusammengestaucht werden können und so eine viel größere Mächtigkeit erhalten, als sie vor der Auspressung hatten; das relativ heiße Material, das wie alle aus tieferen Schichten stammende Substanzen um so flüssiger wird, je mehr der Druck abnimmt (flüssiges Magma der Vulkane!), erstarrt, und die Stelle relativ großer Nachgiebigkeit verschwindet. Das dabei aus den verschiedensten Bauelementen zusammengeschweißte *Gebirge* ist zunächst besonders schroff, die Abtragung ist anormal groß, die Sedimentation an der neuen Küste wächst, und es bereitet sich so die Bildung einer neuen Geosynklinale etwa parallel der alten vor. Figur 200 gibt ein anschauliches Bild über die zeitliche Folge der Ereignisse bei einer solchen Gebirgsbildungsperiode nach STILLE¹⁾. Noch nicht geklärt ist die Frage, wodurch die Senkung, die in Figur 200 b zur Trogbildung geführt hat, bedingt ist. Möglicherweise handelt es sich zum Teil um eine allgemeine Transgression dieses Gebietes infolge der Polwanderung (Figur 158), aber auch isostatische Ausgleichsbewegungen entsprechend der Vorstellung von KOSSMAT können mitwirken. Nachdem aber die Sedimentation begonnen hat, verstärkt sich die Senkung, und die Geosynklinealbildung schreitet fort. Schließlich kommt es zur Auffaltung (Figur 200 c), in den folgenden Epochen wird das Gebirge wieder abgetragen (Paleuropa in Figur 200 c).

¹⁾ Zeitschr. der D. Geol. Ges. 81, 339, 1929.

Kehren wir nun wieder zu den Kräften zurück, welche die Geosynklinalen auspressen. Zunächst haben wir die Spannungen durch die Schrumpfung. Ihnen überlagern sich die Pressungen, welche die Kontinente in der Nähe des Äquators gegeneinander ausüben, wobei sie etwa längs des Äquators eine Aufwölbung von der Größenordnung von 20 Metern über das isostatische Niveau hinaus zu erzeugen suchen. Die hierbei auftretenden Spannungen genügen aber nicht, um eine Bewegung einzuleiten; gemeinsam mit den Schrumpfungsspannungen werden sie aber schließlich in irgendeinem Geosynklinalgebiet, das in der Nähe des Äquators diesem etwa parallel läuft, Bewegungen einleiten,

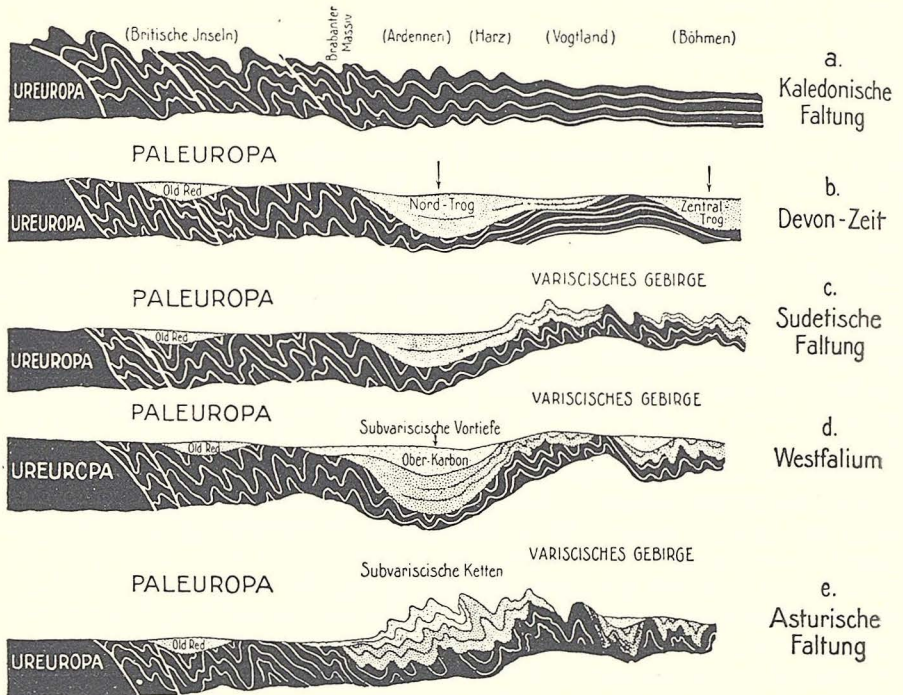


Fig. 200

Geschichte der subvariszischen Vortiefe nach H. STILLE
(Aus Zeitschr. der D. Geologischen Ges., 81, 342, 1929)

Die Figur zeigt an einem praktischen Beispiel in der Mitte und rechts die Geschichte einer Geosynklinalen bis zur Gebirgsbildung und links die Zerstörung eines Gebirges durch Abtragung

die sich dann über größere Gebiete ausdehnen. Der Geosynklinalinhalt gibt nach, strömt teils nach außen, zum größten Teil aber nach innen ab, Unterströmungen suchen das Gleichgewicht herzustellen, immer größere Gebiete werden in Mitleidenschaft gezogen, bis schließlich so große Massenbewegungen stattgefunden haben, daß der Hauptteil der Schrumpfungsspannungen einen Ausgleich gefunden hat. Die Polfluchtkräfte wirken gleichmäßig weiter (vgl. S. 525), sie vermögen auch noch einige Zeit in dem durch die Vorgänge nachgiebiger gewordenen Gebiet weitere Bewegungen hervorzurufen, nach und nach verfestigt sich aber die ganze Masse wieder, und eine Zeit der relativen Ruhe (Epirogenese) tritt ein. Erst wenn in langen Zeiträumen die Schrumpfungsspannungen wieder

stark angewachsen sind, besteht die Möglichkeit einer neuen Orogenese, die nun aber (vgl. S. 524) entsprechend den inzwischen stattgefundenen Verlagerungen des Äquators an anderer Stelle stattfindet. In der Geschichte Europas ist diese gemeinsame Verlagerung der Äquatorzone und der Zone der Gebirgsbildung besonders deutlich zu erkennen (Fig. 201). Gleichzeitig wirken besonders an

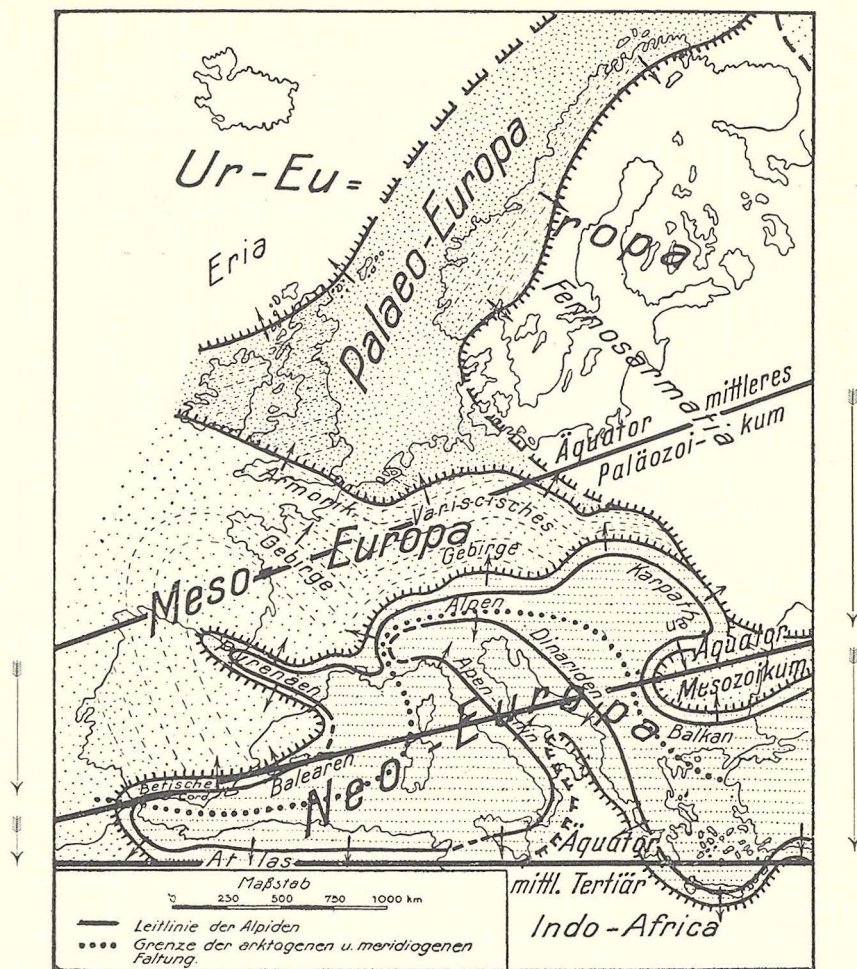


Fig. 201

Zonen der Gebirgsbildung im Paläozoikum (Palaeo-Europa), Mesozoikum (Meso-Europa) und Tertiär (Neo-Europa) nach STILLE und zugehörige Äquatorlage nach GUTENBERG. Beide wandern südwärts, der Äquator voran

dem Rand des Pazifischen Ozeans wie in den Kontinenten die Kräfte, welche das hydrostatische Gleichgewicht herzustellen suchen (vgl. S. 532). Auch ihnen überlagern sich natürlich die Schrumpfkraften, und als wesentliche Spannungen kommen noch solche hinzu, die durch die Polverlagerungen entstehen. Sie fördern die Gebirgsbildung insbesondere in den Gebieten, die sich vom Äquator entfernen (vgl. Figur 201), während sie in den übrigen Dehnungskomponenten zur Folge haben.

Wenn wir nun das ganze *Ergebnis* überblicken, so finden wir, daß es wesentlich komplizierter ist als die seither von den einzelnen Autoren vertretenen Ansichten, mit denen es eine ganze Reihe von wesentlichen Punkten gemeinsam hat (Unterströmungen, Polwanderungen, Kontraktion, Kontinentalverschie-

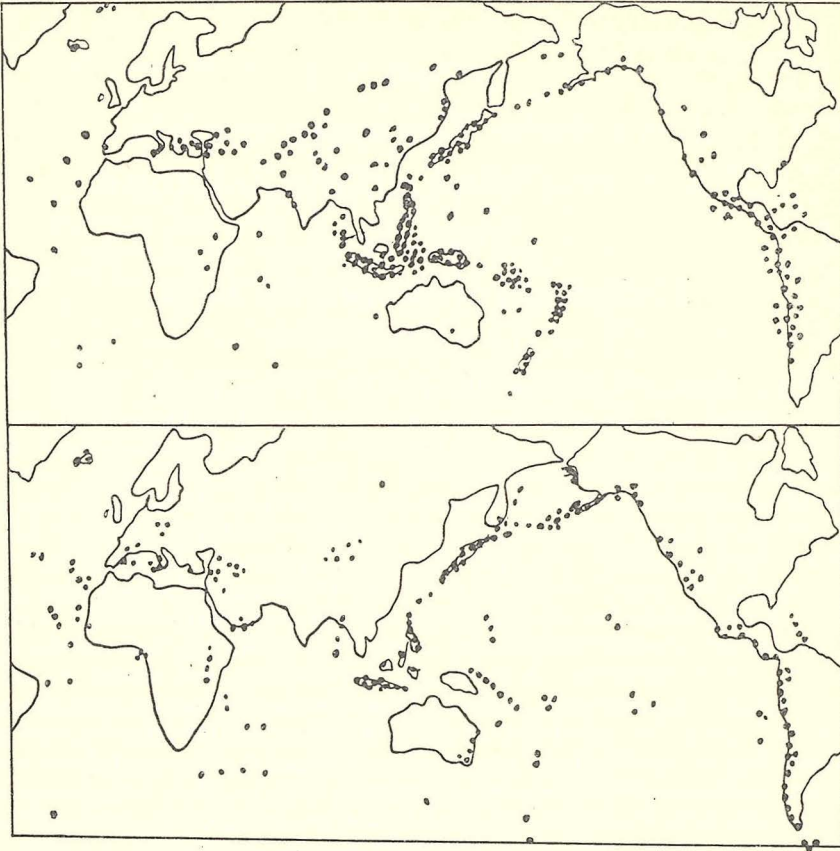


Fig. 202

Oben: Großbebenherde; unten: erloschene und tätige Vulkane

bungen). Auf der andern Seite gelangten wir aber auf dem natürlichen Wege von den theoretisch zu erwartenden Kräften ausgehend hierzu und erkennen im übrigen, daß sich die Erscheinungen viel ungezwungener in das ganze Bild einfügen als bei den Theorien, die alles mit einer einzigen Hypothese zu erklären suchen.